

数字孪生赋能历史文化名城活化的框架与构想

——以惠州为例

文 / 黄建清 广东省城乡规划设计研究院科技股份有限公司

摘要：为落实国家历史文化保护中关于“五保护”的新要求，本文提出了一个以“城市遗产数字孪生”为核心的历史文化名城活化框架，旨在整合测量建模、生成式人工智能等新技术，试图构建一个整合数据采集、高精度建模、动态内容集成与“物理-数字”交互的方法论体系。以国家历史文化名城惠州为具体案例，深入运用此框架在时空维度上高精度复现其独特的“府县双城”格局，并设想通过人工智能构建的历史人物化身，激发古城文化活力。本研究为历史文化名城保护与活化提供了一个技术新范式，推动文化遗产从静态的“展示性”保护向动态的“活态”保护演进。

关键词：数字孪生；历史文化名城；文化遗产保护；生成式人工智能；惠州

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.005

引言

自2022年1月中办、国办印发《关于在城乡建设中加强历史文化保护传承的意见》以来，历史文化保护与传承的工作被提升到全新的高度^[1]，实践中也提出“五保护”——城乡空间全覆盖、资源要素全囊括、古今时间全贯穿、保护展示全方位、社会公众全参与——的更高要求。惠州，素有“岭东雄郡、惠民之州”的美誉，2015年被国务院列为中国历史文化名城，拥有丰富的文化遗产和深厚的文化底蕴。然而，如何将古城的独特魅力传承并融入现代生活，以实现古城的复兴与活化，一直是保护与发展的核心问题。以元宇宙、扩展现实（XR）为代表的沉浸式数字技术浪潮，为破解上述难题带来了前所未有的机遇。但当前的许多讨论仍停留在对概念的宽泛畅想，缺乏具体的技术路径和理论思辨。为了深入讨论，本文引入了“城市遗产数字孪生”（Urban Heritage Digital Twin）这一核心概念。“数字孪生”更强调构建一个与物理城市高精度映射、数据驱动、可进行动态模拟与分析的虚拟对应体。基于此，本文提出以下研究问题：设计并应用一个城市遗产数字孪生框架，使其能够高精度地保存历史文化名城的物质空间要素，以一种沉浸式、互动式的形式活化其非物质文化。

本文在系统梳理相关理论与技术进展的基础上，提出包含“数据采集—平台构建—内容集成—交互部署”的方法框架；以国家历史文化名城惠州为案例，详细演绎该框架的应用策略，以期为历史文化名城的数字化保护与活化提供一套兼具前瞻性与可行性的理论方法。

一、理论基础

（一）数字孪生概念的演进与聚焦

近年来，关于构建沉浸式虚拟世界的讨论，最初是由“元宇宙”（Metaverse）这一概念点燃的。它通常被描绘为一个融合了物理与虚拟的、持久且共享的三维互联网空间^[2]。在文化遗产领域，这个宏大的构想也一度

激发了创建虚拟博物馆、复原历史场景等丰富实践。但当我们这一概念应用于学术和技术场景时，其边界的模糊性，使其显得不够精确。

为了更清晰地推进研究，本文的思路是将前端的“游客体验”与后端的“数据基座”分离开来。游客直接感知的沉浸式环境，可以由“扩展现实”（XR）技术来概括，它囊括了虚拟现实（VR）、增强现实（AR）与混合现实（MR）^{[2][1]}。而真正支撑这些体验、确保其高精度与动态性的核心，用“数字孪生”来表达则更为合理^[3]。数字孪生是物理实体或系统的动态数字化表达，它通过传感器、历史数据与实时信息，与物理世界紧密相连，从而实现学习、推理、模拟乃至预测。在遗产保护领域，这是一种从静态的“数字复制品”向一个动态的、可分析的“数字对应体”的转变。

因此，本文认为，在历史文化名城的保护语境下，我们应将数字孪生作为核心的技术底座。而“元宇宙”理念与XR技术，则可以被视为构建在数字孪生之上的、面向公众的应用界面——是连接技术与大众、实现沉浸式体验和社会化交互的重要桥梁。

（二）数字遗产前沿实践：国际经验与国内趋势

国外，庞贝古城的虚拟复原让游客得以“穿越”回火山爆发前的城市；2019年灾前激光扫描数据，助力巴黎圣母院精准修复，更实证了数字孪生在遗产防灾重建领域的价值。国内，敦煌研究院的“数字敦煌”项目，通过高精度数字化采集和虚拟现实技术，让这一文化宝库以数字形态“回归”故里。故宫博物院则通过“全景故宫”等系列产品，成功地将厚重的历史文化以新颖活泼的形式带给年轻人。然而，现有项目多为单一遗址或博物馆，如何将数字孪生理念系统性地应用于城市尺度，构建一个能够整合多元遗产、承载复杂历史叙事的综合性平台，仍是亟待探索的研究缺口。

（三）人工智能与叙事：让数字遗产“开口说话”

传统的数字遗产模型大多是静态的、沉默的。游客

可以“看”，但无法深入“对话”。生成式人工智能，特别是大型语言模型（LLM）和自然语言处理（NLP）的突破，为改变这一现状提供了可能。借助AI技术，我们可以创建智能的、非玩家角色（NPC）或历史人物化身（Avatars），他们不再是按照预设脚本重复有限对话的“机器人”，而是能够根据游客的提问和互动，动态生成富有逻辑、符合其“人设”的、近乎自然的对话^[4]。将这一技术应用于城市遗产数字孪生，意味着我们可以“复活”历史人物。游客将不仅能看到复原的古建筑，还能与生活在其中的“古人”——如一位宋代商人、一位清代书生，甚至历史名人——进行互动，通过对话来理解他们的生活、思想和他们所处的时代。这为活化非物质文化遗产、传递复杂的历史情境和实现真正的“时空全贯穿”提供了革命性的工具。

二、城市遗产数字孪生方法论框架

本文为城市遗产的数字化保护与活化，提出了由四个核心阶段构成的数字孪生综合方法框架，形成系统化的构建路径。

（一）阶段一：时空数据采集与多源融合

1. 宏观尺度测绘：采用无人机（UAV）搭载的激光雷达（LiDAR）与倾斜摄影测量技术，快速获取城市尺度的三维点云和高分辨率纹理影像。LiDAR能够穿透部分植被，精确捕捉地形地貌和建筑轮廓，对于理解城市与山水环境的宏观格局至关重要^[5]。

2. 微观精细采集：对不可移动文物、历史建筑、历史街巷和历史环境要素等重点保护要素，可采用地面三维激光扫描（Terrestrial Laser Scanning, TLS）和近景摄影测量技术，进行毫米级的精准数据采集，确保对建筑细节、材料质感的采集记录^[6]。

3. 史料深度挖掘：对历史地图、地方志、老照片、绘画、诗文等档案文献开展数字化工作。这些非结构化的历史数据，也可能包含城市风貌的细节描述，为各个时期城市风貌的复原提供了数据支撑。

（二）阶段二：平台构建与高精度建模

1. 点云数据处理与三维建模：将LiDAR和摄影测量获取的海量点云数据进行配准、去噪、分割和分类，并生成具有真实纹理的三角网格模型（Textured Mesh）。

2. 参数化与语义化建模：在几何模型之上向BIM/CIM拓展，为构件赋予年代、材料、保护状况、历史典故等语义信息，形成“可知、可算”的参数化数字孪生，为后续分析与模拟奠定基础^[7]。

3. 多维信息平台集成：依托GIS与游戏引擎（如Unreal Engine），将三维模型与历史文献、多媒体与实时监测数据整合，构建可时空回溯与信息查询的城市遗产数据库。

（三）阶段三：动态内容集成——注入“生命”

1. 历史人物化身创建：利用生成式人工智能为关键历史人物（如对惠州影响深远的苏东坡）创建AI化身。

AI模型通过对大量的史料文献、人物传记、诗词作品等数据的训练，学习并模仿历史人物的语言风格、知识体系和思维模式，使其能与游客进行自然的深度对话^[4]。

2. 非物质文化与生活场景模拟：结合重大历史事件和非物质文化（包括传统技艺、特色民俗等）设计可交互的场景。例如游客可以“亲历”一次节庆巡游，增进对历史文化的体验感^[7]。

（四）阶段四：“物理-数字”交互界面部署

1. 交互系统设计：在真实的古城中，于关键遗产点（如古城门遗址、名人故居、老字号店铺等）部署集成了二维码、NFC或图像识别技术的交互“锚点”。这些“锚点”是现实世界中进入数字孪生的“传送门”。

2. 增强现实应用开发：开发智能手机或AR眼镜的应用程序。游客与交互“锚点”互动后，程序就调用数字孪生数据，把虚拟内容叠加到实景里。这种虚拟现实增强的方式，能让历史更有临场感，更能“打得动人”。

三、惠州历史文化名城应用的构想

惠州，位于珠江三角洲东北，东江中下游，2015年列为国家级历史文化名城。惠州有5000年文明史、2200多年建制史和1400多年建城史，凭借区位和水运优势，成为东江流域经济和文化中心。惠州历史城区于东江、西枝江交汇处，古惠州城依水而建，因水而兴，形成今日“两江四岸”“一街挑两城”府县双城格局，府城部分城墙及“九街十八巷”的格局依然完整。位于府城西侧的惠州西湖，素以景色秀丽，曲折幽深而著称，后因苏东坡而更加声名远扬。本文以历史城区为研究范围，提出了三层虚实共生的框架。

（一）数字基石层：构建“时空全贯穿”的动态文化数据库

本层聚焦搭建四维（3D空间+时间）的动态文化数据库。空间维度上，依托基础测绘、无人机LiDAR与摄影测量，对历史城区核心区开展高精度测量；在多源数据校核的过程中，对现存府城墙与“九街十八巷”等物质遗产的尺度与形态进行细化还原。时间维度的融入可将宋、明、清各时期的惠州府志与古地图进行时序拼接，重建已消失的建筑与环境要素，形成分期的城市三维模型切片，并以互动的方式呈现从隋唐建城、明清鼎盛到近现代变迁的连续轨迹。至于非物质文化的活化，则可将特定时代的方言、叫卖声、节庆民俗以及衣食住行等日常场景纳入数据库；引入人工智能技术，对苏东坡在惠州时期的诗文、书信及《宋史》等材料进行大模型精调，塑造可对话的AI化身，使其在真实场景中能与当代游客进行知识性、情境化的互动。最后形成一个“时空全贯穿”与“资源要素全囊括”可扩展、蕴含丰富文化信息的“活”的数据库，为实现一个真正“活起来”的古城奠定基础。

（二）虚实接口层：部署连接物理与数字世界的“智慧标识系统”

如果说数字基石层是后台数据库，那么虚实接口层

就是连接后台与前台、数字世界与物理世界的关键“中间件”或“应用程序接口(API)”，它为游客提供了一个从现实世界进入虚拟世界的“物理端口”(Physical Portal)。而标识系统则是最好的媒介，其除了承载现实世界基本的导览、图文介绍等功能外，也能作为虚实交互“锚点”。智慧标识可布局在古城的关键节点，如城门遗址、重要的历史建筑、名人故居周边等，其设计应与传统风貌相协调。当游客漫步于真实的惠州古城，行至一处标识前，只需使用智能手机或AR眼镜等设备扫

描，便可被即时“传送”到数字虚拟古城中与当前物理位置精确对应的场景。

例如当游客站在已不复存在的惠州府衙遗址前，扫描智慧标识，其设备屏幕上就能呈现出明代府衙的完整虚拟样貌，其甚至可以“走进”虚拟府衙内探索。为了实现这种精准的虚实锚定，这套智慧标识系统本身在数字虚拟古城中也拥有一一对应的数字孪生体，确保了物理空间坐标与虚拟空间数据之间毫秒级的精准匹配与调用。

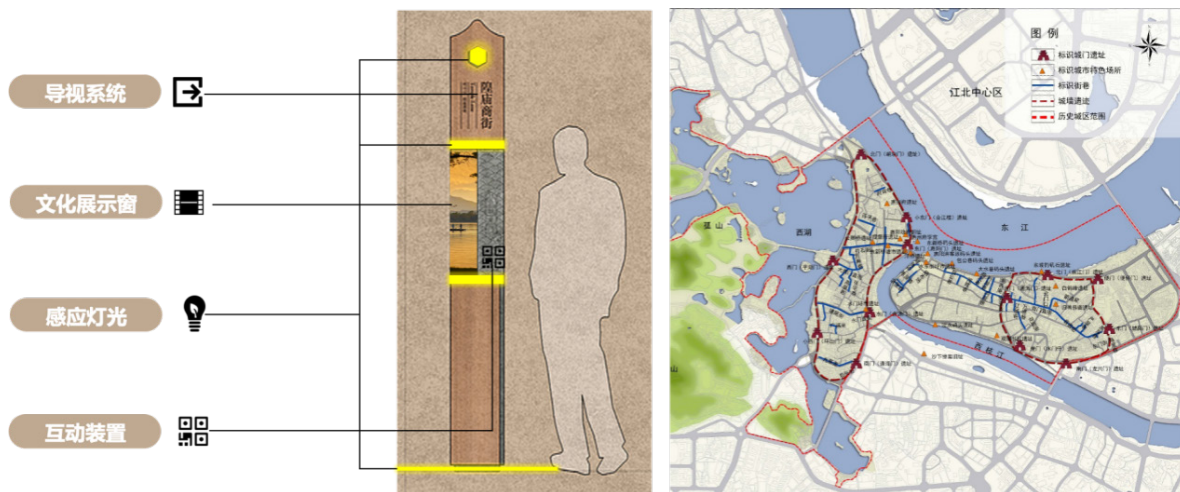


图 1: 互动式智慧标识系统和布局示意图

(三) 沉浸体验层：实现“游戏化”的深度文化互动

沉浸体验层是整个体系中面向公众的呈现面，也是技术投入落地成效的所在。它以“游戏化”的方式组织深度文化互动，让体验变得生动可感。在复原的虚拟古城里，游客既可远观城垣与“九街十八巷”，也能近看祠庙台阁，点开文物的细节卡片，阅读背景与故事；还可与“东坡”数字形象同舟对话，听他谈“日啖荔枝三百颗”的逸事，或闲论“报道先生春睡美，道人轻打五更钟”的心境。该人物亦可充当导览，根据游客所在位置与兴趣吟诵相关诗句，讲解创作缘起与历史情境；游客还可走进一场虚拟东坡庙会，体会宋代惠州的市井烟火。这种在现实与虚拟之间的顺滑切换与深度互动，打破了传统文化旅游线性、被动的游览方式，让历史文化名城不再是“仅存几座冷冰冰的建筑物”，而真正成为一个“活生生的可体验的城市”。

结语

本文提出了一个以“城市遗产数字孪生”为核心的历史文化名城活化框架，整合多源采集、高精度建模、AI 动态内容与虚实交互等技术，力图把遗产从静态物件转化为可感知、可互动、可探索的“活态”系统。以惠州为例的设想，旨在探索其复现城市时空肌理、活化历史文化遗产方面可能拥的潜力。同时也必须认识到本文的框架仅停留在设想阶段，因而本框架仍需在实践中持续校正与打磨。

参考文献

[1] 中共中央办公厅，国务院办公厅．关于在城乡建设中加强历史文化保护传承的意见 [J/OL]．国务院公报，2021，(26)．[2025-10-18]．

[2] 中国信息通信研究院，虚拟现实与元宇宙产业联盟 (XRMA)．元宇宙白皮书 (2023 年) [R]．北京：中国信息通信研究院，2023-11-23．[2025-10-19]．

[3] Ni Z, Hupkes J, Eriksson P, et al. Parametric Digital Twins for Preserving Historic Buildings: A Case Study at Löfstad Castle in Östergötland, Sweden [EB/OL]. arXiv: 2410.14260, 2024-10-31 (v2). [2025-10-18]．

[4] Kindenberg B. The Role of AI in Historical Simulation Design: A TPACK Perspective on a French Revolution Simulation Design Experience [J]. Education Sciences, 2025, 15 (2): 192.

[5] 郭庆华，胡天宇，刘瑾，金时超，肖青，杨贵军，高显连，许强，谢品华，彭焱刚，闫利．轻小型无人机遥感及其行业应用进展 [J]．地理科学进展，2021，40 (9): 1550-1569.

[6] 李敏，刁常宇，葛云飞，等．石窟寺文物的数字化保护与利用 [J]．遥感学报，2021，25 (12): 2351-2364.

[7] 孟卉，李渊，张宇．基于 BIM+ 理念的建筑文化遗产数字化保护探索 [J]．地理空间信息，2019，17 (3): 20-23, 26.