

# 基于数字孪生的长城文化遗产保护与传承研究

## Research on the Conservation and Inheritance of the Great Wall Cultural Heritage Based on Digital Twin

张智  
党安荣\*  
陈杨  
李翔宇  
余建刚

ZHANG Zhi  
DANG Anrong  
CHEN Yang  
LI Xiangyu  
YU Jiangan

**摘要:** 长城文化遗产长期面临风、水、冰雹等自然环境风险。现有研究偏向理论, 缺乏基于数字孪生的实证研究, 尤其缺乏长城文化遗产环境灾害仿真模拟预测的研究。将数字孪生理论模型与实际案例结合, 通过流固耦合分析模拟探索风环境对北京蟠龙山长城的影响, 评估风对建筑结构的影响, 探讨植被、建筑体量等变量对风环境的影响。结果显示, 数字孪生模型能够有效预测文化遗产在风环境下的风险分布, 同时, 植被和建筑体量的变化明显影响了风蚀程度。对于局部坍塌拱券的模拟分析揭示了文化遗产在强风和冰雹灾害下受损的机理。

**关键词:** 风景园林; 长城文化遗产; 数字孪生; 环境风险; 风环境模拟; 遗产保护

文章编号: 1000-6664(2024)06-0035-07

DOI: 10.19775/j.cla.2024.06.0035

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-03-06

修回日期: 2024-04-08

基金项目: 国家文物局重点科研基地研究项目(2023ZCK004); 清华-清尚智慧场景创新设计研究院开放课题(20222910003)

**Abstract:** The Great Wall cultural heritage has long been exposed to natural environmental risks such as wind, water, and hail. Existing research tends to be theoretical, lacking empirical studies based on digital twin, particularly the simulation prediction of environmental disasters for the Great Wall cultural heritage. This paper combines the theoretical model of digital twin with practical cases to explore the impact of the wind environment on the Beijing Panlongshan section of the Great Wall through fluid-structure interaction analysis. It assesses the influence of wind on architectural structures and investigates the effects of variables such as vegetation and building volume on the wind environment. The experimental results demonstrate that digital twin can effectively predict the risk distribution of heritage under the influence of wind environments. Moreover, variations in vegetation and building volume significantly affect wind erosion, and simulation analysis of localized collapse arches reveals the mechanisms of heritage damage caused by strong winds and hail disasters.

**Keywords:** landscape architecture; Great Wall cultural heritage; digital twin; environment risk; wind environment simulation; heritage conservation

运用新技术方法提升文化遗产保护的覆盖率和效率面临全球性的挑战。许多文化遗产长期暴露在自然环境中, 受到降水、飓风、地震、冰雹等自然因素的影响, 导致结构受损<sup>[1]</sup>。累积的破坏会削弱文化遗产结构的完整性, 并可能导致灾难性后果。长城文化遗产串联了时空分布广泛的多种文化遗产类型, 具有“地广、量大、技难”<sup>[2]</sup>的特点, 对于它们的科学保护和有效传承并不容易实现。

为了实现这一目标, 本文首先通过综述数字孪生的前沿理论和方法, 阐述当前研究的不足以

明确本研究的重点。其次, 探索提出“认知-方法-实践”三元耦合的数字孪生理论模型和涵盖“数据采集-模型构建-仿真模拟-展示传承”的技术方法框架, 并通过北京蟠龙山长城的实证案例验证其有效性。最后, 展望数字孪生在赋能长城文化遗产保护与传承的未来研究。

### 1 研究问题聚焦

从世界遗产的角度而言, 价值、真实性与完整性、保护状况是世界遗产突出的普遍价值(outstanding universal value, OUV)的核心

支撑<sup>[3]</sup>。对于长城文化遗产的保护, 首先是基于其价值的保护, 这个价值一方面来自主导文化的鲜明特征, 另一方面亦由多样的弱势文化间接构成。长城文化遗产的整体价值由每个部分的价值共同组成, 但又远远超过了每部分价值的简单叠加, 可以认为是一种涌现。因此, 对于长城文化遗产价值的保护, 重点在于保护其价值载体的完整性。每一部分的破坏都会对长城文化遗产整体价值造成损害。

不同于博物馆内的可移动文物或单体建筑, 长城文化遗产跨越区域乃至跨越国家, 穿

\* 通信作者(Author for correspondence) E-mail: danrong@mail.tsinghua.edu.cn

越荒野连接城镇,对于它的保护极具挑战,主要体现在跨区域统筹、科学分析预警、快速反映决策等方面。长城涉及全国15个省级行政区、404个县<sup>[4]</sup>,每个地区的经济状况、文化背景、遗产保护状况、管理人员水平都有很大的差异。如何将长城文化遗产保护传承的标准和方法统一起来,涉及跨区域的统一规划、资源调配、科技合作等问题。

大量处于野外的长城文化遗产段落,无时无刻不受到风和水的侵蚀。根据国家文物局和国家测绘局的调查,中国境内长城本体受到最广泛和影响最严重的2种风险因素是雨水冲刷和风蚀<sup>[5]</sup>。在人力和资金都非常有限的情况下,如何通过科学的手段提前模拟分析预测,找到区域内遗产坍塌损毁的脆弱点和薄弱点,并采取科学的预防性保护措施,是合理利用保护资源的关键步骤。同时,面临极端天气、地震、泥石流及人为恶意破坏等突发情况,一方面需要提前布设传感器对遗产本体及其赋存环境进行科学、及时、有效的监测和管理;另一方面还需要在意外事件发生时,尽快制定补救方案,尽可能遏制对遗产及其赋存环境的进一步破坏。

长城文化遗产的保护和传承是一件极具挑战的任务,传统的监测、保护、管理方式已无法满足当前的需求。本研究立足于长城文化遗产自然损毁的机理与数字化保护传承的科学问题,探讨将数字孪生理论模型与实际案例结合的现实路径,进而赋能长城文化遗产智慧化保护与传承的远期目标。

## 2 研究进展综述

数字孪生(digital twin)来源于系统工程领域。2002年,Michael Grieves教授在美国密歇根大学鲁瑞工程中心(Lurie Engineering Center)的演讲中提出了产品生命周期管理(product lifecycle management)的概念<sup>[6]</sup>,该概念被认为是数字孪生的原型。数字孪生一词正式被使用且为学界广泛接受是在2010年NASA的一份技术路线报告中<sup>[7]</sup>。当前,数字孪生的概念、理论和技术方法已被广泛用于航天、制造业、建筑、文化遗产保护等领域。国内对于数字孪生理论与技术的研究多集中在工业制造<sup>[8-9]</sup>领域,例如,陶飞等提出了数字孪生在工业制造领域的概念、模型类型、关键技术问题等<sup>[10]</sup>,并获

得了较大的关注。但是在城市研究和文化遗产保护领域,数字孪生的讨论多集中于理论框架、技术路径等方面的构建<sup>[11]</sup>,或者是部分数字孪生相关技术的应用<sup>[12]</sup>,较少有将数字孪生理论与实证案例全流程结合的研究。

根据Michael Grieves教授的描述,数字孪生的定义是:一组虚拟信息结构,从微观原子层面到宏观几何层面全面描述潜在或实际的物理制造产品<sup>[6]</sup>。从当前对数字孪生的文献描述可以看出,数字孪生是一个集成了新技术方法的平台,包含创新的理论、方法和技术,同时也整合了既有技术方法。数字孪生已经展现出在解决复杂系统工程问题方面的巨大潜力,随着信息技术的进步,数字孪生的理论和实践也在逐步完善。

针对长城文化遗产的保护与传承实际需求,从人居环境学科的视角,可将长城文化遗产数字孪生的生成步骤分为数据采集、模型构建、仿真模拟和展示传承。其中,数据采集和模型构建属于数字孪生体的构建阶段,而仿真模拟和展示传承则属于数字孪生体的运行阶段。

### 2.1 数据采集与模型构建

长城文化遗产保护与传承的应用场景内涵广泛,包括国家和区域尺度的遗产分布、区域发展,营堡村落的空间格局,以及单体建筑的稳定性分析,甚至微生物对建筑材料的影响。因此,为了满足这一跨尺度的需求,需要结合数字孪生的应用场景,充分发挥不同数据采集方法的特点和优势,从而制定科学有效的数据采集方案。在实际操作中最常见的方法是利用多种设备和数据进行组合<sup>[13-17]</sup>,以实现多尺度、多精度和多时段的数据获取。点云数据虽然具有极高的准确性,但具有操作耗时、人为介入较多、数据容易出现噪声和错误等缺点;基于无人机的摄影测量灵活方便,大范围作业效率高,但精度有限<sup>[18]</sup>;面向建筑构件甚至更微小的遗产病害,贴近摄影测量<sup>[19-20]</sup>优势明显,但大范围作业效率不高。因此,综合利用无人机、相机、地面激光扫描仪等设备的方法可以充分发挥各自优势,平衡效率和精度。研究证明,面向尺度巨大的测量对象或需要进行跨尺度测量的对象,综合方法往往是最合适的选择<sup>[16-17]</sup>。

随着对文化遗产认识的不断深入,学术界对“模型”的内涵也在不断扩展<sup>[21]</sup>。模型的几何信

息虽然是重要的组成部分,但它还应包括纹理、物理特性、历史信息、病害及过往的干预措施等<sup>[22]</sup>。上述信息可被视为一个数据集<sup>[23]</sup>,共同构成了数字孪生的数字模型。然而,几何模型的实际开发是一个极其复杂的过程。根据不同的使用功能和应用场景确定模型的精度等级(level of detail),并建立多精度等级的数字孪生模型体系是当前学界普遍认可的模型构建理念<sup>[24]</sup>。基于不同的原始数据、应用场景的数字三维模型构建,常见的精确几何模型开发方法包括:基于点云<sup>[25]</sup>、网格<sup>[26]</sup>、非均匀有理B样条(non-uniform rational b-splines, NURBS)<sup>[27]</sup>和历史建筑信息模型(historical/heritage building information modelling, HBIM)<sup>[28-29]</sup>4种方法。

### 2.2 仿真模拟与展示传承

文化遗产保护的观念已经转向主动的预防性保护<sup>[30-31]</sup>,不再仅限于被动的治疗性保护。对于文化遗产而言,维护一个稳定且理想的赋存环境至关重要<sup>[23]</sup>。这对于可移动遗产较为容易实现,但对于不可移动遗产而言,特别是长城文化遗产,则是一个巨大的挑战。因此,基于文化遗产数字孪生,对文化遗产本体及其赋存环境进行模拟仿真成为其保护和传承的重要方法之一。

文化遗产数字孪生可以利用物联网实时收集的数据对文化遗产的状态、性能进行实时预测、分析和决策。Trento等利用基于代理的仿真模拟,在HBIM模型中模拟游客的流线<sup>[32]</sup>。Hussein等对吉萨胡夫金字塔和狮身人面像的风荷载进行了模拟和预测,并定量分析了风蚀对该文化遗产的侵蚀程度<sup>[33]</sup>。国内学者聚焦木结构单体建筑<sup>[34]</sup>、院落组团<sup>[35-36]</sup>等对象,开展了相关风环境模拟分析的定量研究。

集成应用多种空间信息技术,实现文化遗产沉浸式和交互式体验是展示传承研究的趋势,这种展示方式提升了游客的参与感和对文化遗产的理解能力。数字孪生技术的发展促进了文化遗产在不同群体中的有效分享和传播,随着AR、VR、MR等技术的发展,文化遗产以更全面、更生动的形象被展示出来。针对不同的用户群体采用不同的分享模式,使文化遗产的数字化成果更易于被访问和更新<sup>[37]</sup>。数字技术赋能文化遗产展示传播的博物馆4.0时代将要到来<sup>[38-39]</sup>,传统展示空间将基于新技术方法和创新展示理念进行

更新和再组织，以提供更优质的展示、分享、传播体验和服务。

### 3 理论方法构建

#### 3.1 理论构建

文化遗产的保护实践经历了多次思想浪潮的更替<sup>[40]</sup>，本研究将文化遗产的保护与传承归纳为“知”和“行”的关系。“知”包括对文化遗产价值的认知<sup>[41]</sup>，对文化遗产保护实践的科学知识<sup>[42]</sup>，以及对保护传承实践结果的预知<sup>[1]</sup>。如何实现文化遗产保护语境下“知”和“行”的有效互动是关键问题，这需要系统、科学、有效的技术方法，本研究将其称之为“径”。

“径”的主体是数字孪生理论和技术，包括但不限于遥感、大数据、物联网、人工智能、信息共享、社交媒体等技术方法的整合。通过以上技术方法的综合运用，旨在实现“知”和“行”的有效互动，从而促进文化遗产的科学保护与传承。这不仅需要科技手段的应用，也需要政府、学术机构、社会组织、个人等多方的协同合作。

基于上述“知-径-行”的逻辑，进一步构建“认知-方法-实践”的长城文化遗产数字孪生三元耦合理论模型(图1)，该模型重点讨论3组关系及其耦合：整体与部分、现实与虚拟、保护与传承。

对于长城文化遗产价值的系统综合“认知”是保护与传承实践的基础。长城文化遗产价值载体完整性的保护取决于对价值载体的科学认知。

“方法”是指基于数字孪生的理论和技术，构建虚拟空间与现实空间互动的数字化保护传承方法。“实践”的内容涉及长城文化遗产价值的保护和传承2个方面。建立“认知-方法-实践”的数字孪生三元耦合理论模型，旨在为长城文化遗产的数字化保护与传承提供全面支持。下文将结合该理论模型，构建不同尺度长城文化遗产保护与传承的研究和技术方法框架。

#### 3.2 方法构建

技术方法的研究在整个研究体系中起着承前启后的作用(表1)：一方面从认知层面输入文化遗产在不同尺度需要保护的价值和需要防范的风险；另一方面向实践层面输出文化遗产保护的方案，以及价值传承的内容与形式。数字孪生关注的是现实空间与虚拟空间的互动关系，其技术方法主要构建在虚拟空间(或者孪生空间)

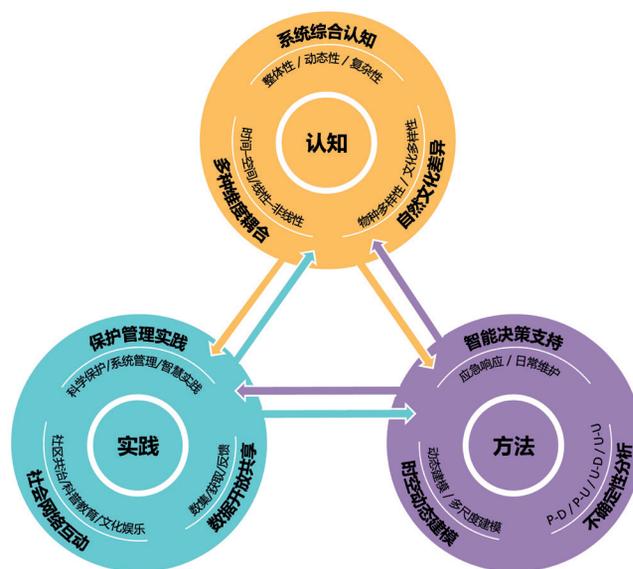


图1 “认知-方法-实践”三元耦合数字孪生理论模型

中，包括数据层、模型层、仿真层和应用层4个方面(图2)。现实空间的物理特征以数字信息的方式向虚拟空间中输入，而虚拟空间中处理、分析、完善的数字化方案以多样化的信息服务模式向现实空间反馈。

### 4 实证案例研究

#### 4.1 实证案例选取

实证研究以蟠龙山长城为例，位于北京市密云区古北口镇(图3)。古北口镇地理位置独特，是北京的三大风口之一，该地区的气候条件相对严峻。本研究的实地调研显示，古北口镇的最高风速可高达23 m/s，且由于其地理位置的特殊性，长城结构容易受到强风的直接影响。

#### 4.2 数据采集与模型构建

蟠龙山长城文化遗产的特点一方面源自前人精巧绝伦的修建，以及之后600余年历史活动留下的痕迹；另一方面则体现在其险要而独特的赋

存环境之中。因此，本研究认识到面向蟠龙山长城文化遗产的数字化记录不能仅限于对长城本体的信息采集，还应该扩展到其赋存环境的考察和记录。实践探索的测量范围综合考虑了文化遗产建设控制地带的范围，明代短程和中程火器的射程范围(分别为350 m和350~1 000 m)，以及选定段落的视线、山势、保存状况等因素。选择从密云309号敌楼至密云312号敌楼的长城文化遗产本体及其赋存环境进行调研和记录(图4)，以便数据采集的成果不仅能用于长城本体的记录、分析、保护和传承，还能在文化景观的视野下展示古代军事设施的选址特征和建造技艺。

综合考虑数据精度、数字孪生应用场景及场地测量条件，本研究决定采用基于无人机摄影测量的数据采集方法，并将贴近摄影测量的技术方法纳入整体的数据采集规划中。在现场操作时面临不少实际困难：长城两侧草木茂密且部分测量墙体高度较低，植被对无人机飞行造成阻碍，飞

表1 多尺度技术方法研究框架

		宏观尺度(国家-区域尺度)	中观尺度(城镇-堡垒尺度)	微观尺度(建筑-节点尺度)
认知	价值	人文：防御体系 自然：山水格局	人文：聚落组团 自然：山水组团	人文：建筑单体 自然：景观节点
	风险	人为：社会动荡、特殊事件等 自然：大气污染、降水变化、气候变迁等	人为：水电设施、旅游开发等 自然：地质作用、水文过程、气象灾害等	人为：违法盗掘、房屋建设等 自然：微生物作用、材料老化、风水侵蚀等
方法	精度	1:2 000以上	1:500~1:2 000	1:1~1:500
	场景	病害分布地图 影响范围分布	赋存环境模拟仿真 区域脆弱点识别	环境变量模拟仿真 结构稳定性模拟仿真
实践	保护	国家级长城保护规划 国家级长城保护法规	区域级长城保护规划 区域级长城保护政策	文物修复设计方案 文物管理维护方案
	传承	整体模型分析与展示	聚落环境、场景展示	建筑环境、建筑构件、病害分析与展示

行空间非常狭小, 贴近拍摄较为困难; 长城作为线性结构文化遗产, 飞行距离和飞行时间较长。由于周边环境复杂, 无法简单地规划飞行完成所有数据采集任务, 需要综合考虑现场实际植被状况、游客人数、气候、风速、光照等因素, 将规划飞行和手动飞行相结合, 以灵活调整数据采集计划(表2)。

针对上述问题, 本研究设计了一套无人机贴近摄影测量线性目标的路径规划方法。图5是飞行任务规划的原理图, 梯形截面的设计兼顾了数据采集对于摄影分辨率、避开底部乔灌木、采集效率等需求, 使得长城文化遗产的数据采集在保证飞行安全的同时实现高效化、自动化。

本次外业工作共进行了6次, 通过内业工作的核验, 梳理了数据缺失和数据质量不达标等问题, 并有针对性地进行了数据补测。通过内外业反复迭代工作, 最终达到了精细化建模的预期模型精度。可以明显看出, 不论是宏观层面的蟠龙山长城本体与赋存环境的关系, 还是中观层面单体敌楼和分段墙体, 以及微观层面每个砖块构件的损毁信息, 都呈现清晰且可测量的状态(图6)。

为了模拟预测遗产风环境对遗产建筑的结构影响, 需要在上述模型成果的基础上重建构件级的有限元模型(图7)。对于砖砌敌楼而言, 需要将砖块、砂浆的模型构建出来, 并对其结构力学特性进行模拟。根据Abdulla等提出的一种简化的微观建模方法, 可以将砖块与砂浆一起建模, 并通过设置砖块间切线和法相方向的力学特征来模拟砂浆连接的物理特性<sup>[43]</sup>。本研究基于上述简化的微观建模方法, 首先在现有模型的基础上还原敌楼建筑的结构体系, 包括一层柱网、二层拱券、三层拱券和围护结构; 其次还原其目前部分坍塌的状态, 并设置相应砖块连接面的物理特性。

#### 4.3 模拟仿真与展示传承

蟠龙山长城文化遗产处在风口位置, 风蚀严重, 本研究开展了风环境数字孪生仿真模拟, 综合考虑AIJ(Architectural Institute of Japan)<sup>[44]</sup>和COST(European Cooperation in Science and Technology)<sup>[45]</sup>给出的仿真模拟策略, 以确保仿真环境参数的准确性和可靠性。在设定计算域和周围环境参数时, 亦遵循了上述标准, 具体而言: 对于位于山顶的蟠龙山长城遗产, 选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型; 以研究区域相对高度(山底至最高敌楼顶部标高)为一个标准H, 上风向设置为

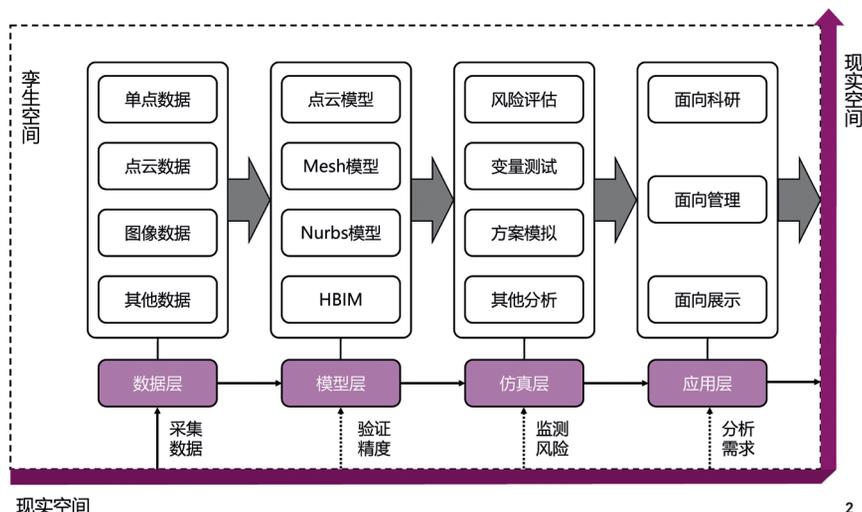


图2 技术方法框架

图3 蟠龙山长城现状

图4 重点测量范围示意图

8H, 下风向设置为15H, 横向设置为5H, 垂直向设置为5H。在整体环境分析中使用Phoenix仿真模拟器; 在流固耦合分析中使用ANSYS Workbench中的Fluent、Transient Structure和System Coupling模块。

在本研究的计算结果中观察到了明显的地形影响, 尤其是对山谷和山顶的风场特性。具体而言, 结果显示山谷地形下的风压相对较大, 而山顶地形下的风压则相对较小。这一现象可能归因于地形对风场流线的影响, 导致风场在山谷区域收缩, 从而增加了风压。相反地, 山顶地形下观察到较大的风速, 而山谷地形下的风速相对较小。这与地形造成的风场流线扩张有关, 使得山顶地形处于较高的风速区域。

这一对比结果强调了地形对风场分布的显著影响, 这对于长城文化遗产的保护至关重要。对山谷地形下风压较大的认识提醒了在保护模式中要加强对这些区域结构稳定性和相关风险的评估, 可能需要采取更为强化的针对性保护措施。而山顶地形下较大的风速则需要考虑结构的抗风设计和相应的保护手段, 以确保长城文化遗产在复杂的地形环境下能够得到有效的保护和传承。这一研究结果将为长城文化遗产的保护实践提供有针对性的依据和指导。

通过对蟠龙山长城文化遗产赋存环境风场的模拟, 不仅能够全面观察长城周围风环境的变化, 更可以识别在研究区域内长城文化遗产的风险分布(图8)。这一模拟过程不仅提供了对遗产周

表2

飞行参数设计

	宏观层面	中观层面	微观层面
制图需求	总图关联环境	建筑关联单体	详图关联病害
制图比例	1:500	1:100	1:10
地面分辨率	4.233 cm/px	0.847 cm/px	0.085 cm/px
航高/距离 <sup>①</sup>	154.50 m	30.90 m	3.09 m
任务规划	100 m井字飞行 50 m井字飞行	25 m井字飞行 5~15 m环绕飞行 5~15 m线性规划飞行	2~3 m规划斜面飞行 0.5~3 m局部手动飞行 0.5~3 m手持设备拍摄

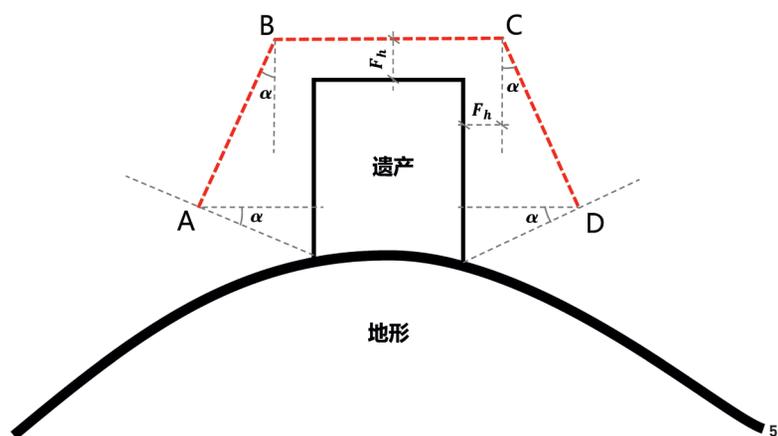
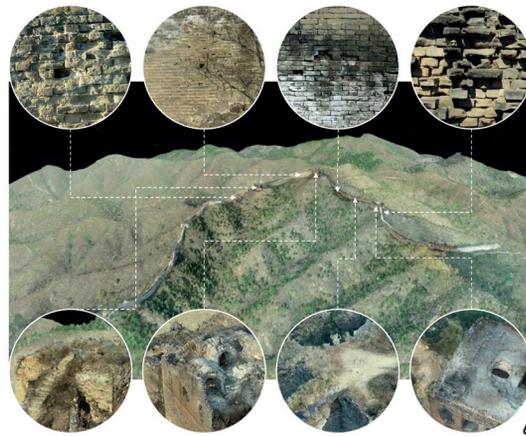


图5 线性目标的路径规划

图6 蟠龙山长城文化遗产数字孪生模型成果

图7 构件级微观建模



围风场动态的深刻认识，也为识别研究范围内长城文化遗产的结构脆弱点提供了量化分析依据。

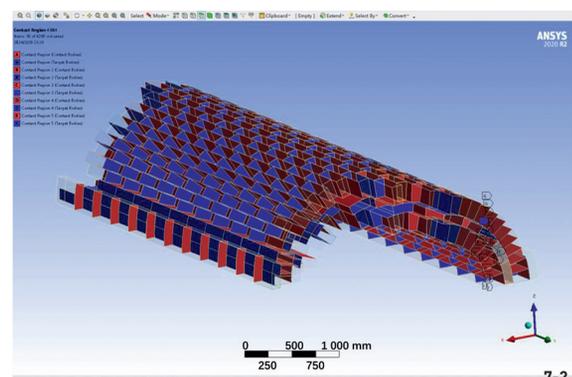
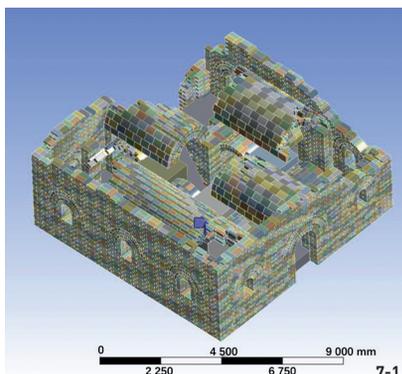
在建筑单体尺度的研究中，重点关注了植被和建筑体量变化对长城文化遗产周围风环境的影响(图9)。通过深入探讨植被和建筑体量变化对风场的影响，得以更全面地认识其在长城文化遗产保护中的作用。

仿真模拟结果表明，长城文化遗产的破损程度与其内部紊流的混乱程度存在正相关关系。具体而言，建筑物破损越严重，其内部的紊流现象越显著，导致建筑内部的风压和风速相应升高，从而导致风蚀程度变得更加严重(图10)。

局部残损拱券结构的损毁场景模拟和推演需要使用简化的微观建模模型。图11模拟的是蟠龙山长城一处部分坍塌的拱券结构，在受到不同压力冲击时的结构应力表现：当一个75 kg重的人摔倒时，结构基本稳定；但2个75 kg重的人同时摔倒时，结构遭到破坏。图12模拟了仅存的窗券结构在受到强风和冰雹撞击或人为撞击时的结构应力表现。

蟠龙山长城的展示传承分为2类：一类面向移动端；另一类面向室内展陈，如博物馆。随着拓展现实(XR)、人工智能(AI)、三维投影(3D Mapping)、三维打印等技术的发展，加之可穿戴式设备、手机、平板电脑等智能设备的普及，文化遗产的展示与传承已不限于传统的二维和三维的表达。展示传承的目的在于提供更好、更全面的游览体验，同时让长城的价值得到更广泛、更深入的传播。

基于前述分析计算和仿真模拟的成果，获得蟠龙山长城的多维时空数字孪生模型，从而创建



多场景的三维动态视图，并利用VR、AR、手机、平板电脑等设备进行显示和互动。图13-1显示了游客佩戴VR设备，通过设备的前置摄像头捕获并识别密云311号敌楼，在操作界面中为游客提供了更丰富的遗产信息和操作选项。图13-2是研究人员或管理人员查看损毁坍塌的遗产段落时，利用云端数字孪生的仿真模拟结果，获得遗产环境变量影响的定量分析结果，辅助其认识和分析遗产破坏的机理，并为现场做出快速准确的决策提供支持。

室内展陈的受众更广，并且可以充分利用最适宜的新兴技术展示长城的价值。蟠龙山长城311号敌楼位于局部的制高点，可以远眺卧虎山，在傍晚时分景色格外优美。调研显示，许多游客喜欢爬到敌楼的拱券上欣赏景色，进而获得新奇而美妙的体验。但这种游览方式可能会加剧敌楼的破坏和损毁。新的展示方法提供了另一种选择，图14显示了博物馆中一处沉浸式体验的展示场景设计。首先，利用前述获得的高精度三维模型，通过三维打印技术建造一座1:1的敌楼

模型，并在模型上方搭建一处钢化玻璃平台。其次，将整个构筑物置于一个弧形的巨幕空间中，使游客的前方、左侧、右侧和下方都置于虚拟展示空间中。虚实结合的场景为游客提供了更加多样和更安全的游览体验。

## 5 总结与讨论

本文探索了基于数字孪生理论和技术的长城文化遗产保护传承的研究方法，讨论了最新数字孪生技术在文化遗产保护中的应用、趋势和不足，涵盖数据采集、模型构建、仿真模拟及展示传承等方面，进一步提出了“认知-方法-实践”的长城文化遗产数字孪生理论和技术方法框架，以理清基于价值的保护理念、基于数字孪生的新技术方法和保护传承实践之间的关系。为了验证上述理论和方法，通过北京市密云区蟠龙山长城文化遗产数字孪生的构建，提出了基于无人机摄影测量的长城文化遗产数据采集和模型构建的方法。本研究定量分析和模拟了位于北京“风口”的蟠龙山长城受风环境的影响程度，实验结

果表明,数字孪生模拟能有效预测遗产受风环境影响的风险分布,且植被、建筑体量变化明显影响风蚀程度。对局部坍塌拱券的模拟分析揭示了遗产受强风和冰雹灾害影响的损毁机理。最后结合移动智能设备和博物馆沉浸式展览技术,针对不同的应用场景设计了基于价值保护传承的展示利用方案。

总体而言,本研究的结果阐明了数字孪生理论和技术在长城文化遗产保护和传承中的潜力和新见解。但是限于客观条件,本研究尚存在如下不足和待讨论的问题。

1)物联网设备的部署和基于人工智能的工作流程自动化方面存在挑战。在遗产本体及其周围环境中布置物联网监测设备需要经过严格的论证和规划。目前,本研究主要利用公开渠道获取的环境数据,如历史和实时的风速、温度、降雨量、湿度等,虽然能够预警和监测文化遗产受环境灾害的影响,但如果能够结合长城本体的数据,这种模拟预测将会更加精准和有针对性。

2)摄影测量数据受遗产环境的限制。对于长城文化遗产而言,基于无人机、高清相机等设备的摄影测量方法具有明显优势。然而,在植被遮挡区域,数据并不完整,要获取该部分的数据可能会对遗产及其周围环境造成进一步的破坏。

随着数字孪生理论和技术不断发展,工作流程也将朝着自动化、平价化、轻量化的方向迈进,进而提高保护利用效率,同时节约管理者、专家和游客的时间和金钱成本。数字孪生为长城文化遗产的保护与传承赋能,将进一步推动文化自信自强战略的开展和实施。

注:文中图片均由张智拍摄或绘制。

#### 注释:

- ① 宏观、中观层面的飞行航高基于起飞点,微观层面的拍摄距离基于测量对象。

#### 参考文献:

- [1] Fraunhofer center for international management and knowledge economy IMW. *Cultural Heritage in Crisis: Cultural Heritage Research at European Level—challenges in Times of Climate Change and Digitalization*[M/OL]. [2024-01-23]. Leipzig:

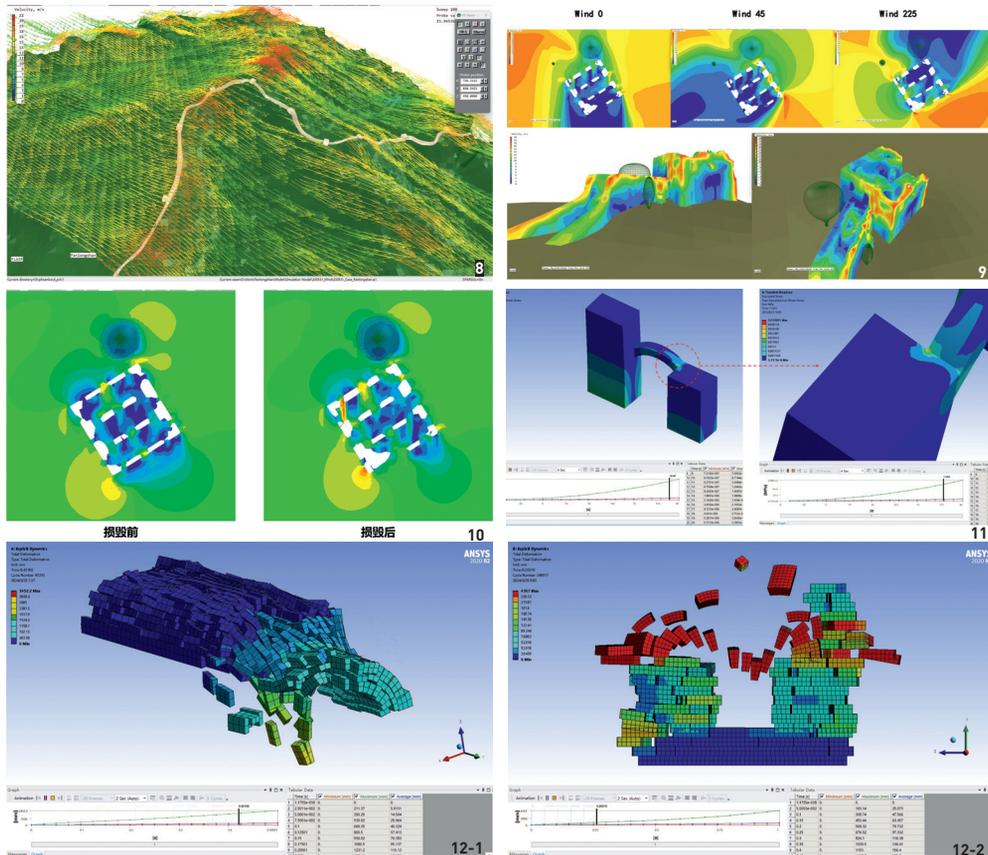


图8 遗产本体风险判定

图9 敌楼建筑周围高大乔木对风场的影响

图10 不同损毁程度建筑内部风场模拟

图11 不同重量冲击拱券结构的破坏机理

图12 强风和重物撞击对残留窗券的破坏机理

图13 基于可穿戴式设备和移动智能设备的使用场景

图14 室内沉浸式展示场景



- ICOMOS DocCentre, 2020. <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2369>.
- [2] 张智, 党安荣, 侯妙乐, 等. 长城文化遗产保护与利用的信息技术方法框架构建[J]. 遥感学报, 2021, 25(12): 2339-2350.
- [3] 吕舟. 北京中轴线申遗研究与遗产价值认识[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版), 2015, 13(2): 11-16.
- [4] 国家文物局. 中国长城保护报告[R]. 2016.
- [5] 刘文艳, 许慧君, 冯二元, 等. 中国长城保护报告(2017—2018)[J]. 中国文化遗产, 2020(2): 91-102.
- [6] Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Switzerland: Springer, 2017: 85-113.
- [7] Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap[J]. *Technology Area*, 2010, 11: 1-32.
- [8] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017(7): 41-45.
- [9] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [10] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [11] 张新长, 李少英, 周启鸣, 等. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[J]. 测绘科学, 2021, 46(3): 147-152.
- [12] 姚佳伟, 张星翌, 王健, 等. 基于数字孪生技术的城市微气候预测方法研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 183-192.
- [13] Brumana R, Quilici S, Oliva L, et al. Multi-sensor HR mass data models toward multi-temporal-layered digital twins: maintenance, design and XR informed tour of the multi-stratified Appian Way (PAAA)[J]. *Sensors*, 2023, 21(17): 8556.
- [14] Franco P A C, De La Plata A R M, Sendin M P. Investigating a workflow for obtaining physical models from digital twins obtained through photogrammetry and TLS: new ways for a sustainable dissemination of heritage[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(2): 1057.
- [15] Konstantakis M, Trichopoulos G, Aliprantis J, et al. An enhanced methodology for creating digital twins within a paleontological museum using photogrammetry and laser scanning techniques[J]. *Heritage*, 2023, 6(9): 5967-5980.
- [16] 李哲, 孙肃, 李严. 长城保护研究中多源航测数据利用框架图[J]. 中国文化遗产, 2018(3): 78-84.
- [17] 霍芃芃, 侯庆明, 周庆, 等. 基于多种数据源的三维重建方法研究: 以北京明长城为例[J]. 测绘通报, 2020(S1): 262-267.
- [18] 王兵, 汤羽扬, Vita M D. 明长城的建构信息数据获取、分析与建筑遗产保护研究: 以北京延庆石峡长城为例[J]. 中国文化遗产, 2017(4): 92-98.
- [19] 何佳男. 贴近摄影测量及其关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [20] 张祖勋. 数字摄影测量的发展与展望[J]. 地理信息世界, 2004(3): 1-5.
- [21] Marra A, Trizio I, Fabbrocino G, et al. Digital models for e-conservation: The HBIM of a bridge along the Aterno river[J]. *Scientific Research and Information Technology*, 2021, 11(2): 83-96.
- [22] Mohammadi M, Rashidi M, Mousavi V, et al. Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: bridge case study[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3499.
- [23] Vuoto A, Funari M F, Lourenço P B. Shaping digital twin concept for built cultural heritage conservation: A systematic literature review[J/OL]. [2024-02-10]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2023: 1-34. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583058.2023.2258084>.
- [24] Volk R, Stengel J, Schultmann F. Building information modeling (BIM) for existing buildings—literature review and future needs[J]. *Automation in Construction*, 2014, 38: 109-1027.
- [25] Hinks T, Carr H, Truong-Hong L, et al. Point cloud data conversion into solid models via point-based voxelization[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2013, 139(2): 72-83.
- [26] Hacıfendioglu K, Maras E E. Photogrammetry in documentation and ambient vibration test of historical masonry minarets[J]. *Experimental Techniques*, 2016, 40(6): 1527-1537.
- [27] Vincenzi L, Bassoli E, Ponsi F, et al. Dynamic monitoring and evaluation of bell ringing effects for the structural assessment of a masonry bell tower[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2019, 9: 439-458.
- [28] Moyano J, Leon J, Nieto-Julian J E, et al. Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: point cloud segmentation for HBIM parameterisation[J]. *Automation in Construction*, 2021, 130: 103856.
- [29] Barazzetti L, Banfi F, Brumana R, et al. Cloud-to-BIM-to-fem: structural simulation with accurate historic BIM from laser scans[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, 57: 71-87.
- [30] 吴美萍. 欧洲视野下建筑遗产预防性保护的理论和实践概述[J]. 中国文化遗产, 2020(2): 59-78.
- [31] 戎卿文, 张剑葳. 从防救蚀渍到规划永续: 论国际建筑遗产预防性保护之意涵[J]. 建筑学报, 2019(2): 88-93.
- [32] Trento A, Wurzer G, Coraglia U M. A digital twin for directing people flow in preserved heritage buildings[C]//Sousa J P, Henriques G C, Xavier J O P. *Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference: 1*. Porto: eCAADe SIGraDi FAUP, 2019: 561-568.
- [33] Hussein A S, El-Shishiny H. Influences of wind flow over heritage sites: a case study of the wind environment over the Giza plateau in Egypt[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(3): 389-410.
- [34] 张佳敏, 姚珊珊, 吕红医, 等. 基于风环境分析的木构建筑遗产保护研究: 以初祖庵大殿为例[J]. 自然与文化遗产研究, 2023, 8(1): 71-80.
- [35] 陈家宏. 基于气象数据对建筑遗产的微气候模拟及风险评估: 以碧云寺为例[J]. 中外建筑, 2024(1): 88-94.
- [36] Han Y, Chun Q, Xu X, et al. Wind effects on Chinese traditional timber buildings in complex terrain: the case of Baoguo temple[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 59: 105088.
- [37] Bruno S, Sciotti A, Pierucci A, et al. Verbum-virtual enhanced reality for building modelling (virtual technical tour in digital twins for building conservation)[J]. *Journal of Information Technology in Construction*, 2020, 27: 20-47.
- [38] 林少雄. 博物馆4.0时代的物质叙事与空间融合[J]. 美育学刊, 2018, 9(4): 18-23.
- [39] 桂潇璐. 数字技术打造未来博物馆: 德国博物馆4.0项目(museum4punkt0)观察[J]. 科学教育与博物馆, 2022, 8(1): 92-97.
- [40] 吕舟. 中国文化遗产保护三十年[J]. 建筑学报, 2008(12): 1-5.
- [41] 吕舟. 论遗产的价值取向与遗产保护[J]. 城市与区域规划研究, 2017, 9(1): 214-226.
- [42] 党安荣, 梁媛媛, 陈麦尼, 等. 历史文化名城保护的信息技术方法研究进展与趋势[J]. 中国名城, 2021, 35(4): 33-37.
- [43] Abdulla K F, Cunningham L S, Gillie M. Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach[J]. *Engineering Structures*, 2017, 151: 349-365.
- [44] Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10-11): 1749-1761.
- [45] Franke J, Hellsten A, Schluenzen K H, et al. The cost 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2011, 44(1-4): 419-427.

(编辑/马琳)

**作者简介:****张智**

1989年生/男/江西萍乡人/清华大学建筑学院在读博士研究生/研究方向为城乡规划技术科学及文化遗产数字化保护(北京 100084)

**党安荣**

1964年生/男/陕西佳县人/清华大学建筑学院教授, 博士生导师/研究方向为城乡规划技术科学及文化遗产数字化保护(北京 100084)

**陈杨**

1982年生/女/湖南常德人/清华大学建筑学院助理研究员/研究方向为空间信息技术支持文化遗产保护(北京 100084)

**李翔宇**

1992年生/男/山西太原人/清华大学建筑学院助理研究员/研究方向为土地利用与公共政策(北京 100084)

**余建刚**

2000年生/男/江西抚州人/清华大学建筑学院在读硕士研究生/研究方向为文化遗产数字化保护(北京 100084)