基于数字孪生技术的文化遗产保护价值阐释与实施路径研究

张蓓蓓　林鹏飞　束霞平

摘　要： 文化遗产是人类文明的历史见证,激发了民众的文化归属感和民族的共同体意识,在地域认同和国家认同的建构中产生了强大的向心力和凝聚力。作为文化遗产保护的新兴力量,数字孪生技术不仅可以为文化遗产的保护方式带来重大改变,而且还能为文化遗产保护提供全新的视角、工具和解决方案。文章系统梳理了数字孪生技术的发展、内涵、关键技术和现状,并结合时空数据资源的整合与虚拟现实的联动两大维度,深入分析了该技术在文化遗产保护中的应用及其对多类型文化遗产的全覆盖保护、高质量阐释、展示与传播的影响。研究表明,数字孪生技术的应用不仅能够使文化遗产保存与利用更为精确和高效,加强公众对传统文化的了解和参与,进一步促使文化遗产向可持续的方向发展,同时为文化遗产的保护和传承提供理论支持和实践指导。

关键词： 数字孪生技术;文化遗产保护;价值阐释;实施路径
中图分类号:K878　**文献标识码:**A　**文章编号:**1004-9142(2025)01-0092-10

文化遗产是古代文明智慧结晶的重要承载体,是悠久历史和血脉相承的民族记忆的见证,具有不可替代的历史、艺术和文化内涵。然而文化遗产保护始终面临着一些不确定因素的挑战与威胁。伴随着社会思想的变迁,国际秩序的变革,气候环境的变化及科学技术的进步,文化遗产的保护日益成为国际组织、各国政府以及民间团体、个人关注和重视的研究课题。除了文化遗产的传统实体保护和研究之外,国际文化遗产保护和修复研究中心(ICCROM)还启动了“可持续数字遗产”计划,旨在连接各领域的

作者简介:张蓓蓓,苏州大学艺术学院教授、博士生导师,工学博士;林鹏飞,苏州大学艺术学院博士研究生;束霞平,苏州大学艺术学院研究员,文学博士,本文通讯作者。

基金项目:苏州大学人文社会科学青年跨学科研究团队资助项目“中国古代服饰的数字孪生”、国家社会科学基金艺术学项目“清代皇家仪仗用具研究”(21BG106)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、教育部人文社会科学研究青年项目“17—18 世纪江南与宫廷衣物织造技艺互动研究”(24YJC760007)的阶段性成果。

知识、推动发展,并通过技术手段挖掘数字遗产的潜力[①];《国际图联战略计划 2016—2021》中的文化遗产保护倡议旨在“建立全球保护记录性文化遗产的专业中心;建立不同形式的内容收集和保护标准;与文化遗产保护机构合作推动风险登记,保护世界文化遗产”,[②]侧面强调了数字技术在文化遗产保护中的重要性。近年来,被看作是不断发展和扩张的数字宇宙的数字孪生技术,通过数据与模型的集成,构建精准的数字化物理对象,[③]将数字和物理两大迥异对象实现融合,且可以利用虚拟现实(VR)、增强现实(AR)或混合现实(MR)的智能系统进行操作,在文化遗产保护领域具有巨大的应用前景。本文旨在探索数字孪生技术在文化遗产保护中的内涵、发展及其应用现状,并结合实际案例,探讨其价值阐释和实施路径,以期为文化遗产的保护和研究提供一条新的数字化技术赋能的可能之径。

一、数字孪生技术的内涵、发展及其应用现状

数字孪生技术作为一种前沿数字技术,其核心在于通过虚拟与现实之间的双向动态交互,实现对物理实体的全生命周期监测、模拟和优化。随着 5G 及 AIGC 的快速发展,数字孪生技术的应用范围与功能持续拓展,尤其在推动各行业的数字化转型中发挥了关键作用。

(一)数字孪生技术的内涵、发展及其关键技术

数字孪生技术主要通过数字模型精确映射物理实体至虚拟空间,实现数据的实时交互,为底层数据的集成奠定基础,从而增强仿真与预测能力,优化相关决策过程。2002 年,迈克尔·格里夫斯(Michael Grieves)教授在美国密歇根大学(The University of Michigan)鲁瑞工程中心(Lurie Engineering Center)演讲时提到产品生命周期管理(product lifecycle management)的概念,[④]且在面向工业界发表《PLM 的概念性设想》(Conceptual Ideal for PLM)时,提出数字孪生的概念模型。[⑤] 2010 年,美国国家航空航天局(NASA)在其太空技术路线图中使用了数字孪生的表述。[⑥] 随着 2013 年工业 4.0 概念及以智能制造为主的第四次工业革命的提出,数字孪生逐渐受到广泛关注,[⑦]西门子等企业推出了相关应用模型,推动其在工业领域的应用。2014 年,通用电气、参数技术公司、达索系统等知名软件公司开始在市场宣传中使用数字孪生这一术语,促进其在工业制造与设计仿真中的广泛传播。2017 年,数字孪生已被视为航空航天与国防领域六大前沿技术之一,并被高德纳咨询公司(Gartner)列入 2017 年至 2019 年战略科技发展趋势。2022 年,伴随元宇宙概念的兴起,数字孪生在多个领域得到实际应用。[⑧] 该技术依赖人工智能、物联网(IoT)和虚拟现实(VR)等技术的进步,应用领域不断拓展。2023 年,中共中央及国务院发布的《数字中国建设整体布局规划》[⑨]明确将数字孪生作为基础技术,突显了智能管理与环境保

---

① “Be a learning partner and join the Sustaining Digital Heritage programme”, https://www.iccrom.org/news/call-application-becoming-learning-partners-and-join-sustaining-digital-heritage-programme, 2023 年 4 月 26 日。

② 《〈国际图联战略计划 2016—2021〉发布》,《国家图书馆学刊》2016 年第 4 期。

③ 易雪琴:《国内外数字孪生城市建设的经验及启示》,《信息通信技术与政策》2023 年第 8 期。

④ 张智、党安荣、陈杨等:《基于数字孪生的长城文化遗产保护与传承研究》,《中国园林》2024 年第 6 期。

⑤ Grieves, M. and Vickers, J. *Digital*, “Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,” in Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Switzerland: Springer, 2017, pp. 85-113.

⑥ Mike Shafto, Chair, Mike Conroy, Rich Doyle, Ed Glaessgen, Chris Kemp, Jacqueline LeMoigne and Lui Wang, *Modelling SimulationInformation Technology & Processing Roadmap: TechnologyArea* 11, NASA Office of Chief Technologist, 2010, p. 6.

⑦ 陈健、盛谦、陈国良等:《岩土工程数字孪生技术研究进展》,《华中科技大学学报(自然科学版)》2022 年第 8 期。

⑧ 尹亚丽、郭亚宁:《基于知识图谱的全球数字孪生技术研究态势分析》,《通信管理与技术》2021 年第 3 期。

⑨ 《数字中国建设整体布局规划》,http://www.news.cn/2023-02/27/c_1129401407.htm,2023 年 2 月 27 日。

护的重要性。截至2024年,AIGC与AI Agent的快速崛起进一步推动了虚拟与现实的共生发展,形成了“天-空-地-人”的智慧感知网络,促进了孪生场景的低成本和灵活构建。生成式AI等前沿技术的应用标志着数字孪生从基础阶段向高级阶段的转变,促进了各行业的数字化转型和升级。

数字孪生成为数字化基础平台中重要的新一代数字化转型信息技术,具有以下五大内涵:其一,数字孪生是一种支持经济社会数字化转型的通用使能技术(enabling technology)。其二,该技术实现了物理空间与赛博空间的双向交互与动态反馈。其三,其核心技术要素包括数据、模型与软件的三位一体结构。其四,数字孪生具备描述、诊断、预测与决策四个功能层级。其五,数字孪生的特征在于数据驱动、模型支撑、软件定义、精准映射与智能决策,这构成其广泛应用的基础。① 日益蓬勃发展的数字孪生,其关键技术主要在于建模、渲染及仿真功能和特性。现代建模技术通过3D扫描、参数化建模与逆向工程构建物理实体的数字模型,代表性软件包括SolidWorks和CATIA。渲染技术利用基于物理的渲染、实时渲染与云端渲染生成高度逼真的视觉效果,主流平台如Unreal Engine和Unity。仿真技术则依托有限元分析、多物理场耦合与实时仿真,模拟实体在不同环境下的动态行为,代表性软件有ANSYS与ABAQUS。这些技术的高效应用依赖于计算机图形学、计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)与物理仿真等多个领域的协同发展。西门子、Dassault Systèmes、Autodesk等工业软件巨头,以及Nvidia、AMD等GPU制造商,正在推动数字孪生技术的演进。建模、渲染与仿真三大核心技术与物联网(IoT)紧密结合,通过协同作用实现对物理实体的全面数字化、可视化与智能化管理。未来,随着这些技术的进一步融合,数字孪生技术将实现更广泛和深入的应用,推动其成熟发展。②

(二)数字孪生技术的应用领域及其现状

随着信息技术的进步和发展,数字孪生已经在解决系统工程方面展现出巨大潜力,③并在工业制造、城市治理、农业生产、医疗服务以及文化遗产保护等诸多不同的领域得到广泛应用。(见图1)在制造领域,数字孪生技术能够借助虚拟环境和科学仿真,为各个企业提供科学的决策依据。通过实时收集和分析生产数据,可以准确地辨认出生产阶段可能碰到的各种挑战,进而改善生产过程并提升产出效率和产品的质量水准。在智慧城市建设的过程中,数字孪生技术通过实时同步物理环境和数字模型,实现对城市行政管理的精准监控和决策支援。利用智能感知系统,融合各个地区的信息,并通过专门算法进行深入数据挖掘,有助于提升城市的运营状况及管理的智能化程度。在交通领域,车辆导航、交通安全和智能化驾驶等应用已成为核心话题。通过实时获取并分析交通数据,使交通管理系统能够进行模拟仿真并进一步优化,从而为城市的交通管理策略提供有力支持,增强其安全和稳固的特性。在农业领域,数字孪生技术通过实时的农场监控和动态的生产模式管理应用,辅助农业从业人员依据气候变化、病虫害问题和季节性变化进行科学的决策,从而提升生产效能。在医疗领域,数字孪生技术以虚拟人体模型为载体,对病人的生理和病理状态进行仿真,为医生诊断提供更有效的治疗方案。同样,数字孪生技术在文化遗产保护方面也做出积极的探索和应用,如苏州古城为解决古城保护与更新过程中的冲突,采用数字孪生技术打造“数字孪生场景”;敦煌研究院在敦煌文化遗产保护中采用三维重建技术,高精度数字化采集洞窟结构和壁画,并以敦煌石窟文物数据管理平台和“数字敦煌”资源库平台为依托,融合大数据与人工智能,通过构建“数字敦煌开放素材库”,促进了文物数据的开放共享和协同创新。数字孪生技术逐渐成为全球信息技术发展的新焦点。④ 高德纳咨询公司(Gartner)连续三年将其列为战略

① 《数字孪生白皮书(2019年)》,https://ccidgroup.com/info/1096/21685.htm,2019年12月19日;张好林、杨传书、李昌盛等:《钻井数字孪生系统设计与研发实践》,《石油钻探技术》2023年第3期。

② 朱雅妹、胡杏:《中国数字孪生行业报告》,《清华五道口研究报告》2024年第13期。

③ 张智、党安荣、陈杨等:《基于数字孪生的长城文化遗产保护与传承研究》,《中国园林》2024年第6期。

④ 闫深义:《焊接机器人数字孪生模型构建与演化》,哈尔滨工业大学2021年硕士学位论文。

科技发展趋势之一,[①]并预测在未来五年内将推动颠覆性创新。[②] 随着全球企业布局的加速,数字孪生技术正在成为新的战略方向,西门子、参数技术公司、达索系统和 ESI 等公司纷纷提出相应的战略,结合前沿技术实现双重效益增长。美国工业互联网联盟将其视为核心技术之一,中国、新加坡和法国等国家积极利用数字孪生技术推动智慧城市建设,实现智能化与可持续发展。可见,数字孪生技术已成为全球数字化转型的重要驱动力。

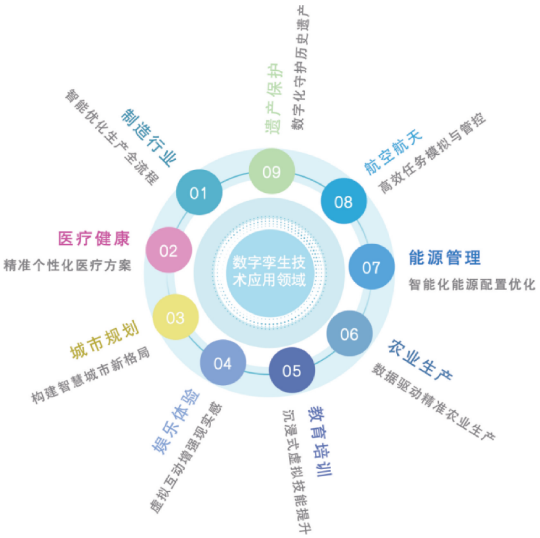


图 1　数字孪生技术的主要应用领域

二、数字孪生技术赋能文化遗产保护的价值阐释

由于人为或自然环境的原因,许多文化遗产本体遭到不可逆损害,尤其是一些非物质文化遗产面临严重的危机。传统的“以物为本”的文化遗产实体修缮与保护技术,难以应对大规模、多样化的文化遗产保护需求。随着数字时代的到来,文化遗产保护从文化遗产本体的修复型保护延展到数字技术成为文化遗产保护的重要工具,数字技术的快速运用促进了文化遗产保护方法与路径的迭代升级。

文化遗产保护的本质是通过各种可能的方法和路径,保护人类物质和精神财富,让多类型的文化遗产在当代及未来能够与人类和时代共生、共存乃至共荣。利用数字采集、数字存储、数字处理、数字展示、数字传播等数字技术将文化遗产转换、再现、复原成可共享、可再生的数字形态,并以新的视角加以解读、新的方式加以保存、新的需求加以利用,[③]日益成为文化遗产保护的新型方式和手段。[④] 数字孪生技术赋能文化遗产的保护,就是凭借高融合性、强渗透性、广覆盖性的多层次数字技术,以创新性的文化生产方式给予文化遗产更鲜活、更弥久的生命力和延展力,实现文化遗产的固有价值(历史、艺术、科学

① 《数字孪生白皮书(2019 年)》,https://ccidgroup.com/info/1096/21685.htm,2019 年 12 月 19 日。
② 冯瑞:《数字孪生:用虚拟优化现实》,《中国科学报》2021 年 8 月 19 日,第 3 版。
③ 张颖璐:《新媒体与少数民族文化传播》,《金田》2012 年第 9 期;王耀希:《民族文化遗产数字化》,人民出版社 2009 年版,第 156-157 页。
④ 卓么措:《基于数字技术的非物质文化遗产保护与传承研究》,《中国经贸导刊》2013 年第 1 期。

价值)、创生价值(文化、经济和社会价值)与产业价值等多维价值协同的良性循环,[①]达成赋值的文化延展模式,实现文化遗产保护的可持续发展和社会价值的再造。

(一)融合时空数据资源,构建数字孪生模型,为文化遗产的保护提供仿真模拟和展示传承

数字孪生技术利用先进的信息技术建构文化遗产物理实体的虚拟副本模型,通过对原型文化遗产所反映的对象在其所处的客观环境和社会条件下进行反演、模拟和实验,从而揭示原型文化遗产的发展变化规律,实现多维度的文化遗产精确分析、对实体状态的实时监控和仿真模拟及预测等。该技术基于大数据、3D 地理信息系统(3DGIS)、激光扫描和数字制图等前沿科技,实时收集文化遗产的环境数据和物理变化的同时,通过计算机系统模拟、分析和研究,并在可视化的条件下提供决策支持,增强文化遗产保护与研究的科学性与可预见性。一方面直接为原型文化遗产提供保护方案,另一方面为数字文化遗产工程建设提供物理参数。通过文物模型、建筑模型、遗址模型等仿真模型和反映非物质文化遗产建立的仿真模型等探讨和研究文化遗产模型体系的构建,以对文化遗产保护起标准化、数据化和科学化的实践路径指导。

与传统的其他数字化技术相比,数字孪生技术不是仅停留在静态数据的采集和存储层面,其还可以通过采集的数据预测文化遗产可能面临的风险和损害,可以利用机器学习和深度学习技术,智能运算和识别文化遗产的退化形式,可以通过对时间和空间数据的深度融合,全面解析文化遗产物理特征、文化内涵和历史脉络等,实现对文化遗产数字化存档、虚拟修复以及为长期保护提供全新方案和决策支持。2019 年巴黎圣母院着火的突发事件震惊全世界,幸有安德鲁·塔隆(Andrew Tallon)在 2015 年通过激光扫描生成的数十亿数据,将巴黎圣母院的全景及内部结构完整记录和保留下来,利用数字孪生技术不仅可以建造出逼真准确的圣母院大教堂全景式三维数字孪生模型,而且还能辅助对教堂内部结构进行可视化研究。2020 年河南二里头考古遗址公园 SA+MEC 智慧云 XR 数字孪生平台、2021 年北京海淀区数字孪生可视化平台、[②]2022 年长城文化遗产数字孪生系统的研发等项目运行和上线,[③]成为利用虚拟现实(VR)技术在数字虚拟空间和场景中构建文化遗产数字孪生等实际应用与实践的典范。[④] 此外,通过数字孪生技术对非遗工艺、非遗传承人和非遗所处的文化生态、应用场景进行多维可视化展示,对非遗制作过程进行视觉化和数字化虚拟呈现,日益成为非遗数字化和活态化保护的新方式,如贵州苗族蜡染工艺[⑤]的数字化展示、阳新布贴[⑥]等传统手工艺的展示成为基于数字孪生技术的非遗活态化保护的一种新尝试。

随着数字技术的不断成熟,通过对时空数据的整合,开发和创建专门的文化遗产数字孪生技术平台将成为一种可能。平台可以集成 3D 建模、数据分析、虚拟体验等多种功能,全面呈现多类型文化遗产的物理属性,深入解析其文化内涵、历史脉络及其与周边社会的互动关系;同时为多类型文化遗产保护的主体提供一站式文化遗产保护和管理服务,满足不同保护需求,提高文化遗产的保护效率,增强文化遗产的可见度和影响力;亦可以进一步挖掘和实现文化遗产保护领域的创意产业和商业潜力。

---

① 张蓓蓓、刘晏祯:《数字化赋能中国文化遗产保护的发展现状、现实挑战与未来路向》,《苏州工艺美术职业技术学院学报》2024 年第 2 期。

② 杨晓维:《数字孪生技术在大运河世界文化遗产监测中的应用》,《中国港口》2023 年第 S2 期。

③ 党安荣、张智、信泰琦,等:《长城文化遗产保护与传承数字化发展进程与趋势》,《长城学研究》2022 年第 1 辑,燕山大学出版社 2022 年版,第 203-216 页。

④ 余书敏、赵芸、余随军:《形式、孪生、逻辑——虚拟现实技术在四川文化遗产数字化领域的实践》,《自然与文化遗产研究》2024 年第 2 期。

⑤ 宗诚、邱欣妍、白新蕾:《非遗视角下苗族蜡染技艺的数字化传承》,《印染》2024 年第 5 期。

⑥ Min Li, Shengtao Xu, Jie Tang and Wenfeng Chen, "Design and research of digital twin platform for handicraft intangible cultural heritage-Yangxin Cloth Paste," *Heritage Science*, no. 12, 2024, p. 43.

（二）数字孪生技术驱动虚拟现实联动，为文化遗产提供高质量的阐释、展示与传播

文化遗产保护的目的，不仅仅是对文化遗产的本体及其文化场域的保护，还应通过文化遗产实物载体、数字载体高质量阐释文化遗产的文化要义，解读和探寻文化遗产的历史，阐释其生产手段、传承手段和转换手段等，保留最真实的记忆，进行详实的文化注解。然而传统的摄影、录像技术虽然可以记录和存储遗产相关数据，但长期保存困难、数据易失真和存储空间有限的问题仍然无法避免。[①] 这不仅导致文化遗产的数字资源难以得到有效共享和传播，也为文化遗产的可持续保护带来了困难。此外，各文化机构在遗产保护方面缺乏统一标准，导致资源分散，形成“信息孤岛”，数据难以互通，效率低下。[②] 地方图书馆和非遗馆的信息资源多局限于馆藏，无法进行系统化管理和高效共享。[③] 各部门之间的资源壁垒不仅限制了资源共享，还造成了重复建设和浪费。随着虚拟现实（VR）技术的不断发展，数字孪生技术介入为文化遗产资源的共享及文化遗产的展示、传播和阐释带来了新的机遇。数字孪生技术通过整合多维时空数据，为文化遗产提供了全方位、多角度的立体展示，有效克服了传统展示方式在空间和时间上的局限性。虚拟博物馆作为一种新型信息载体，凭借其强大的交互功能，使参观者能够获得更直观的视觉体验，并深入解读文化遗产的历史背景和文化内涵。凭借数字孪生技术，可以让观众在虚拟环境中近距离感受文化遗产的细节，还能在动态交互中体验文化遗产的历史脉络与精神内涵。法国国家科学研究中心利维奥·德·卢卡（Livio De Luca）创建的“巴黎圣母院”国际联盟团队通过数字制图、可视化软件、虚拟现实（VR）、云计算、三维可视化技术等多种数字孪生技术重建了其完整的三维模型和场景搭建，使公众得以在虚拟空间中探索巴黎圣母院的微观结构和历史背景。湖南博物院在马王堆汉墓考古发掘50周年之际推出“生命艺术——马王堆汉代文化沉浸式数字大展”，[④]通过前沿多媒体技术，全新演绎马王堆文化遗产。洛阳古墓博物馆则推出了一个名为《忘川遗书》的互动解谜游戏，玩家可以在不同的故事线中扮演角色进行多次尝试，这无疑增加了玩家的参与热情。“央博”数字文化艺术博物馆举办了“何以文明——中华文明探源工程成果数字艺术大展”，[⑤]采用沉浸式方法复原了十个重要的考古遗址，为大众提供了一个生动体验中华五千年历史文化的窗口。[⑥] 南京博物院的“线上+线下”虚拟展览项目将高精度的数字化技术和虚拟现实（VR）技术相结合，让更多观众能够通过虚拟手段深入了解文物背后的文化背景。[⑦] 这一系列展示方式不仅增强了文化遗产的可见性与公众的互动性，还拓宽了其在全球传播中的新路径，充分展示了数字孪生技术赋能文化遗产保护的内在价值。

此外，数字孪生空间的创建为文化遗产数字资源的共享提供了技术支持。[⑧] 联合国教科文组织（UNESCO）的虚拟博物馆项目以及由联合国环境规划署世界保护监测中心（UNEP-WCMC）和世界自然保护联盟（IUCN）建立的多样性保护数据库、PANORAMA遗产保护方案共享平台等多个数据库使全球的公众得以在线接触并深入了解世界各地的文化遗产，不仅提升了全球遗产知识传播速度，也促进了跨

① 白晋湘、朱鹏：《数字化视角下传统体育文化遗产保护与传播》，《北京体育大学学报》2024年第6期。

② 孙传明、程强、谈国新：《广西少数民族非物质文化遗产数字化保护现状及对策分析》，《广西民族研究》2017年第3期。

③ 王伟杰、肖远平：《贵州少数民族非物质文化遗产数字化保护现状及发展对策》，《湖北民族学院学报（哲学社会科学版）》2018年第4期。

④ 段晓明：《丝路视域下马王堆汉墓文物的活化利用与发展》，《博物馆管理》2023年第4期。

⑤ 周小玲、孟祥云：《在大学数学教学中融入安阳优秀传统文化》，《文化创新比较研究》2023年第25期。

⑥ 杨晓萌：《千年遗存 时代新辉——多元方式展示文化遗产的魅力》，《中国美术报》2024年6月24日美术聚焦版。

⑦ 《南京博物院“物华天宝——数字文物之美”活化利用示范项目获评2024文化遗产保护数字化国际论坛数字遗产最佳实践案例》，《东南文化》2024年第4期。

⑧ 张洁、谢鑫：《基于数字孪生技术的文化遗产数字人文建设：应用场景、体系架构及运行模型》，《高校图书馆工作》2023年第4期。

国合作关系的深入发展。[①] 可见,通过将虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术相结合,文化遗产的保护和传播得以突破时空限制,变得更加生动和广泛。未来,随着科技的持续进步,数字孪生技术预计将在文化遗产的保护、学术探索和文化创新等领域起到更为重要的作用,为文化遗产的保护注入新的活力。而且,数字孪生技术也为文化遗产教育提供了全新的意义和视角。通过虚拟现实(VR)技术,观众可以在高度模拟的文化环境中进行沉浸式学习,不仅可以全面了解文化遗产的历史背景,还可以通过个性化的学习路径获得定制化的教育体验。

三、基于数字孪生技术的文化遗产保护的推进路径

当前,文化遗产的数字化保护仍主要集中于数据收集,内容的深入挖掘、系统阐释与传播存在较大提升空间。数字孪生技术在多领域具有明显优势,如虚拟重构与沉浸式体验、实时监控与预警系统构建、互动教育模式以及公众参与等领域(见图 2),通过技术的革新与集成、标准的制定、国际协作与资源共享、可持续发展等多种策略,可以更科学、高效和全方位地进行文化遗产保护。

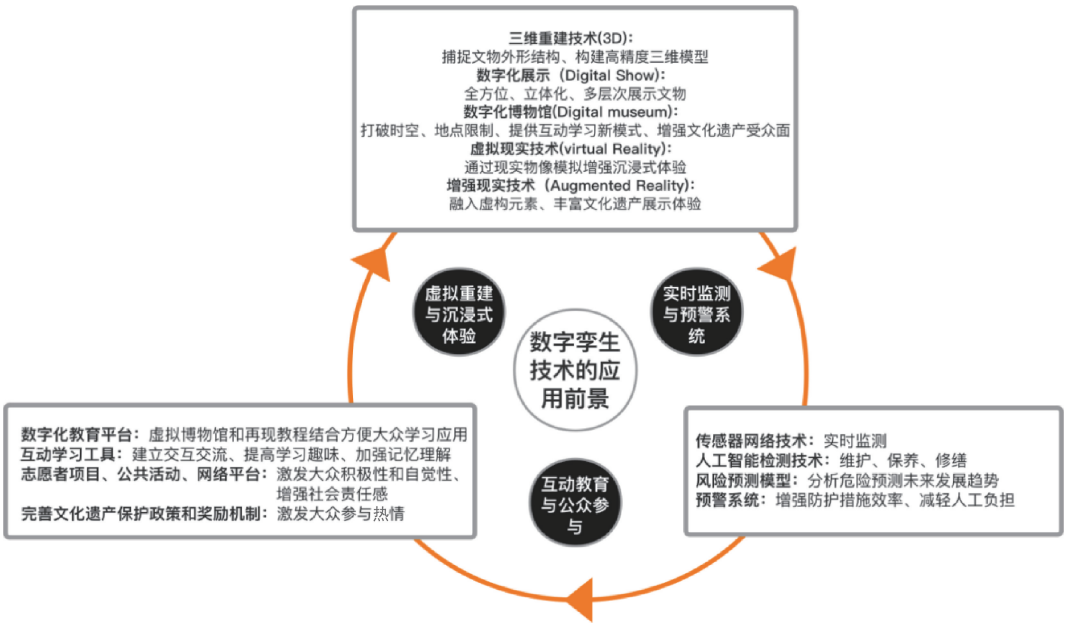


图 2　数字孪生技术在文化遗产保护中的应用前景

(一)技术集成创新与智能分析平台构建

数字孪生技术通过三维扫描、建模、渲染等方式将文化遗产数字化呈现。以庞贝古城为例,利用三维激光扫描和照相测量技术精确再现了古城的细节,让观众更好地感受古城的历史文化。增强现实(AR)和混合现实(MR)技术通过将虚拟信息与真实场景相结合,不仅提升了文化遗产的展示质量,还增强了观众的参与感。要保护文化遗产,需要综合多种数据,如历史文献资料、考古资料、建筑结构信息以及环境监测资料等,文化遗产的保护需要各项数据的整合,但目前遗产保护中各类数据相对独立,难以直接融合在一起。数字孪生技术不仅能够有效整合不同类型数据,为文化遗产保护提供科学的多源数据融合技术,同时伴随着学科交叉的快速发展,亦能够成为深入挖掘文化遗产信息、解决文化遗产保

① 刁常宇、刘建国、邓非,等:《笔谈:数字化为文明赋彩——文物和文化遗产数字技术应用现状与实践路径》,《中国文化遗产》2024 年第 2 期。

护复杂问题的有效手段。

技术集成创新与智能分析平台的构建(见图3),一方面依托数字孪生技术的集成,可以提升文化遗产展示效果,精确复原文化遗产本体风貌,推动遗产文化的传播;另一方面,通过多源数据的融合与智能分析,可以实现辅助决策、监测预警和数据共享,进一步增强文化遗产保护的科学性与管理效率。2024年,坐落于梵蒂冈城的天主教最神圣的标志性建筑——圣彼得大教堂委托一家意大利工程公司 Italferr,利用地理空间测绘技术捕捉教堂建筑上的每个细节,为该教堂的建筑提供全面的数字记录,创建了一套包括大教堂数百年全面信息的数字孪生虚拟副本模型,利用物联网(IoT)传感器(包括倾斜仪和加速度计)传回的实时数据为修复工作提供支持;建立强大的监测系统,用先进算法及应用程序建立监测系统,分析结构对于静态及动态应力的响应,深入了解教堂建筑结构的实际状况,开发出永久性的结构检测系统,通过网络传感器密切监测建筑是否存在恶化或损坏的动态数据,集成至数字孪生模型之中,为日后该教堂的设施维护和翻新、修复及管理提供数字共享。与传统共享应用相比,数字孪生的数据共享效率更高。同样,北京中轴线文化遗产监测与保护平台通过三维数字孪生技术的遗产监测系统,实现了遗产变化监测和风险预防,有效保障了遗产的真实性与完整性。北京中轴线的数字孪生展示,亦表明北京中轴线文化遗产不是一个静态的遗址,而是一个还在生长变化的空间,通过数字展示技术构建的数字平行时空、孪生的建筑和街景,呈现了中国古代城市建设的宇宙观及其与城市当代生活的关系。数字孪生技术在虚拟和现实之间、时间和空间之间架构了一个无形无色无味的数字关联,映射了当下城市发展和数字人文,将文化遗产的精神理念在当代活态延续,从虚拟孪生到现实生活,实现人与文化遗产的"共生"。

随着数字孪生技术的不断进步,文化遗产的保护工作需要不断进行技术创新和优化来提升数据处理的效率。结合传感器技术和人工智能算法以及大数据分析的能力,使文化遗产保护工作的科学性和系统性得到进一步增强,从而促进全社会共享的文化遗产服务体系的建立,以加强与各地文化资源的合作与交流,促进中国文化遗产保护与传承工作的开展。①

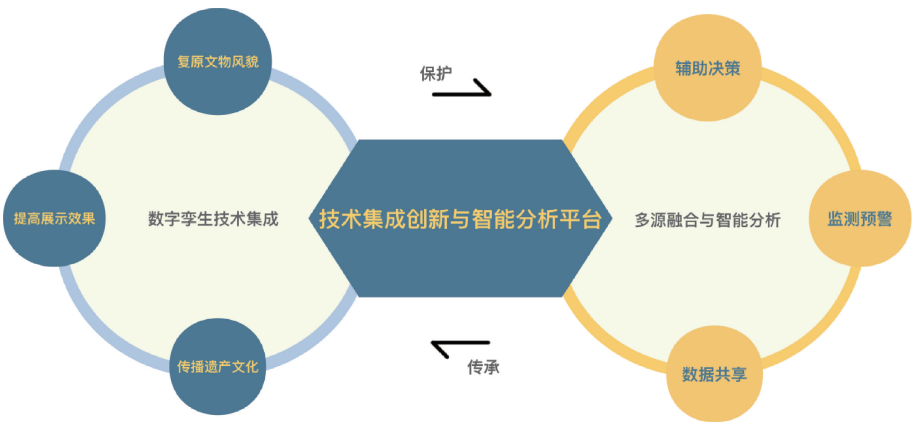


图3　技术集成创新与智能分析平台

(二)数字孪生数据标准与规范体系建设

为了确保资料的连贯性和可比较性及数字孪生模型的普适性和互操作性,建设一致的数据标准与规范体系显得尤为重要。(见图4)这不仅可以提高数据的可信度,还有利于提升数字孪生技术在不同项目中的使用效率。欧盟为更好地将数字技术融入历史文化遗产的保护工作中,制定了一系列标准和

① 张祝平:《以数字技术推动传统文化传承发展的路径选择》,《行政管理改革》2024年第2期。

法规,涵盖了三维扫描技术、摄影测量和环境监测等领域,确保了测量结果的精确性和一致性。这些规范为文化遗产保护中的数字化建模提供了可靠依据,提升了文化遗产的数字孪生模型的精度与稳定性。在处理数字孪生数据时,标准化的数据处理程序尤为关键。① 数据清理、建模、渲染等环节,都需要严格遵循既定的流程,以确保数字化模型的精确度和可靠性。如日本虚拟“犬山城”复原项目为构建高精度和整体性的数字模型,详细制定了从数据清理到模型搭建与渲染的规范流程。这种标准化流程的制定,不仅可以提高数据处理的效率,还可提升最终模型的质量和可操作性。

另外,为了确保数字孪生模型具有广泛的适用性和互操作性,有必要构建一个全面的规范体系,该体系应涵盖建模标准、数据格式以及质量评估等多个方面。意大利庞贝古城构建了一套全面的造型规范体系,以确保模型具有高质量和实用性。这种标准体系不仅对文化遗产的保护具有适用性,同时也为其他多个领域提供了高效的参考模式。建立严格的论证流程机制,以确保数字孪生模型的稳定性和权威性。通过标准化的数据处理和严谨的认证流程,不仅可以提升模型的质量和准确性,还为文化遗产的广泛共享和长期保护奠定了坚实的基础。

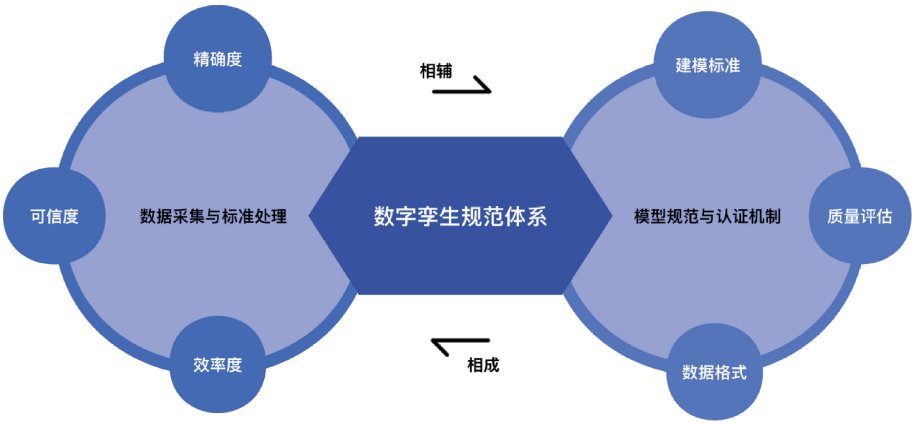


图 4　数字孪生数据标准与规范体系

(三)国际合作与资源共享数字孪生技术平台的创建

文化遗产保护是全球共同的责任,打造资源共享的国际合作平台意义重大。(见图 5)面对各国面临的文化遗产保护难题,可以通过构建国际合作机制,推动技术交流和资源共享建立统一的跨国数据共享平台,促进不同国家和地区之间的文化遗产保护合作。近年来,如何通过大数据技术对文化遗产资源进行智能化分析和管理,推动全球文化遗产保护工作向数字化、智能化方向发展,已有越来越多的国家和组织开始探索。欧盟 Europeana 项目建立了一个国际性的资源共享平台,通过对欧洲各地的文化遗产数据进行整合,该平台不仅促进各国在文化遗产保护方面的合作,还通过大数据分析手段深入挖掘整理文化遗产信息,通过多领域、跨学科的数据整合与共享,为保护全球文化多样性提供技术支撑。Europeana 平台的智能数据分析和实时监控技术,保证了遗产信息的共享和持续更新,让文化遗产的保护和管理更加高效。② 这种国际合作模式,在促进全球知识共享、促进跨国合作项目深入开展的同时,也提升了文化遗产保护的科学性。

同时,欧盟各成员国的文化遗产管理部门也纷纷创建了自己的数字孪生平台,以便为大众提供如信息检索、知识挖掘和数据解析等多种服务。这些平台的广泛应用不仅增强了文化遗产保护的透明性和

① 李佳维:《基于数字孪生的多尺度三维模型构建及数据处理关键技术分析》,《电子技术》2024 年第 4 期。
② 汪静:《Europeana 发展现状及启示》,《数字图书馆论坛》2017 年第 3 期。



图 5　国际合作与资源共享保护平台

开放性,还为全球的学者创造了一个开放的研究氛围,从而进一步推动了学术的交流和合作。显然,建立一个国际合作和资源共享平台是处理全球文化遗产保护问题的核心策略之一。借助数据的国际共享和技术的共同创新,不仅可以提高文化遗产的保护效果,还为全球遗产资源的融合和共享提供了坚实的后盾。此外,越来越多的国家将文化遗产保护与发展纳入其对外文化交流中。这一国际合作框架的形成,不仅代表了技术的进步,同时也是各国共同肩负的文化遗产保护的职责所在。

四、结论

文化遗产的保护是持续性、长期性的工作,需要日益发展的技术支撑。数字孪生技术不仅为文化遗产保护提供了强有力的技术支撑,而且推动了文化遗产从静态保存向动态活化转型,还拓宽了传播途径,提升了观众的体验感。基于此,数字孪生技术在未来有着三大发展路径:技术集成创新与智能分析平台的构建、数字孪生数据标准与规范体系的建设、国际合作与资源共享数字孪生技术平台的创建。这些路径将为推动数字孪生技术在文化遗产领域的持续创新与应用提供有力支持。数字孪生技术在文化遗产保护领域将有着巨大的发展前景,一方面它能够通过高精度三维建模技术和虚拟展示技术,对文化遗产进行虚拟重塑,提供沉浸式观展体验,增强文化遗产的文化传播和教育价值;另一方面数字孪生技术赋能的实时监测和预警系统使文化遗产保护变得更为科学,极大地降低人力成本。此外,传感器网络和智能分析平台的实时监测和数据分析能有效预防潜在危险。通过数字教育平台和各种互动工具,人们的参与热情和对文化遗产保护的意识都得到了提升,这对于建立文化遗产保护共同体起到了积极作用。展望未来,为了使数字孪生技术在文化遗产保护中发挥现代化、科学化和可持续的作用,技术创新、标准化建设和公众参与显得非常必要。随着相关技术的不断发展与完善,数字孪生技术在文化遗产虚拟呈现、实时监测、资源共享等方面将继续发挥着非常重要的作用,既为文化遗产的数字化挖掘和创新性传承提供新的发展动力,又为数字经济与文化产业的深度融合发展,开辟一条新的路径。

(责任编辑:若峦)