

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2025)06-2304-21

论文引用格式: Li Q S, Ni T, Luo X, Zheng J W, Yang F, Zhang L, Pan Z G and Wang M L. 2025. Research progress on digitalization of cultural heritage and digital tourism visualization service technology. Journal of Image and Graphics, 30(6):2304-2324(栗青生, 倪婷, 罗欣, 郑嘉雯, 杨帆, 张莉, 潘志庚, 王美丽. 2025. 文化遗产数字化及数字文旅可视化服务技术研究进展. 中国图象图形学报, 30(6):2304-2324)[DOI: 10.11834/jig.250033]

文化遗产数字化及数字文旅可视化服务技术研究进展

栗青生¹, 倪婷², 罗欣^{1,3,4*}, 郑嘉雯², 杨帆², 张莉⁵, 潘志庚⁶, 王美丽⁷

1. 浙江传媒学院媒体工程学院, 杭州 310018;
2. 浙江传媒学院新闻与传播学院, 杭州 310018;
3. 伦敦大学学院数学与物理科学学院, 伦敦 WC1E6BT, 英国;
4. 杭州良运智能科技有限公司, 杭州 311113;
5. 湖北经济学院工商管理学院, 武汉 430205;
6. 元宇宙文旅场景应用技术研究江苏省文化和旅游重点实验室, 南京 210044;
7. 西北农林科技大学信息工程学院, 杨凌 712100

摘要: 随着虚拟现实技术与文旅产业的快速发展, 文化遗产数字化及数字文旅可视化服务逐渐受到重视。本文旨在围绕文化遗产数字化与数字文旅可视化服务技术研究进展深入研讨。首先, 分析人工智能深度学习技术在文化遗产数字资源采集、存储、融合和共享等方面的研究现状及挑战; 接着, 结合文化遗产的文旅应用, 探讨数字技术如何推动文化遗产保护向数字化、智能化转型, 特别是高精度三维扫描、虚拟现实(virtual reality, VR)和增强现实(augmented reality, AR)等技术在数字文旅可视化服务和个性化推荐中的应用及其挑战; 然后, 梳理文化遗产数字化与可视化服务技术在文旅融合服务平台建设方面的应用的现状与趋势, 并分析人工智能、大模型应用和机器学习等在平台建设中的赋能作用, 为文化遗产的数字化保护与传播提供理论与实践支持; 最后, 总结人工智能(artificial intelligence, AI)赋能文化遗产数据处理的技术, 指出随着人工智能与大数据技术的崛起, 数字文旅服务成为文化产业与旅游产业融合的关键力量, 文旅融合服务平台将推动文化遗产数据的智能分析、预测性保护和多场景应用, 进一步推动文化遗产数字化及文旅可视化技术的个性化、可持续发展。

关键词: 文化遗产; 数字化技术; 文旅融合; 人工智能(AI); 可视化服务

Research progress on digitalization of cultural heritage and digital tourism visualization service technology

Li Qingsheng¹, Ni Ting², Luo Xin^{1,3,4*}, Zheng Jiawen², Yang Fan², Zhang Li⁵, Pan Zhigeng⁶, Wang Meili⁷

1. School of Media Engineering, Communication University of Zhejiang, Hangzhou 310018, China;
2. School of Journalism and Communication, Communication University of Zhejiang, Hangzhou 310018, China;
3. Faculty of Mathematical and Physical Sciences, University College London, London WC1E6BT, UK;
4. Hangzhou Liangyun Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou 311113, China;
5. Business School of HBUE, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China;
6. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Culture and Tourism for Research on the Application Technology of Metaverse Cultural Tourism Scenarios, Nanjing 210044, China;
7. College of Information Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: With the rapid advancement of virtual reality (VR) technology and the cultural tourism industry, the digitalization of cultural heritage and digital cultural tourism visualization services have garnered increasing attention. This paper

收稿日期: 2025-01-21; 修回日期: 2025-03-14; 预印本日期: 2025-03-21

* 通信作者: 罗欣 luoxin020228@163.com

基金项目: 浙江省重点研发项目资助(2021C03137)

Supported by: Key R&D Program of Zhejiang Province, China(2021C03137)

investigates the research progress in the fields of cultural heritage digitalization and the use of digital cultural tourism visualization service technologies. Initially, this work analyzes the current status and challenges of artificial intelligence (AI) and deep learning technologies in the collection, storage, integration, and sharing of cultural heritage digital resources. In recent years, AI-driven technologies have significantly transformed the methods of cultural heritage digitization and preservation, enabling more efficient and accurate approaches to data collection and management. Subsequently, this paper explores how digital technologies facilitate the transition of cultural heritage protection from traditional methods to more digital and intelligent approaches. In particular, the integration of high-precision 3D scanning, VR, and augmented reality (AR) technologies into digital cultural tourism services has opened up new possibilities for immersive experiences and personalized recommendations. These technologies allow users to interact with cultural heritage in innovative ways, virtually visit sites, and explore objects that would otherwise be inaccessible. However, these advancements also pose challenges in ensuring the authenticity, integrity, and accessibility of digital reproductions, as well as in addressing the technical limitations of current tools. This paper further examines the applications of cultural heritage digitalization and visualization technologies in the development of integrated cultural tourism service platforms. These platforms leverage AI, machine learning, and large models to provide personalized recommendations, optimize resource allocation, and enhance user experiences. By integrating cultural heritage data with tourism services, these platforms create a seamless connection between cultural preservation and tourism. Currently, the ability to offer tailored cultural experiences to visitors based on their interests, behaviors, and locations has become an essential feature of modern cultural tourism services. Additionally, by generating new opportunities for public engagement and revenue generation, these platforms contribute to the sustainable development of cultural heritage preservation and the tourism industry. AI plays a crucial role in empowering the development of cultural tourism integration service platforms. In particular, machine learning algorithms are increasingly being used to analyze user preferences and historical data, thereby improving the accuracy and efficiency of cultural heritage management and protection. For instance, AI algorithms can predict potential risks to cultural heritage sites as well as suggest preventive measures to mitigate damage. Moreover, AI enables smarter and more efficient data management, facilitating the long-term preservation and sharing of cultural heritage resources. These technologies drive the ongoing digital transformation of cultural tourism, opening up new possibilities for cultural dissemination and public engagement. Finally, this paper discusses the potential of AI and big data technologies in driving the continued evolution of cultural heritage digitalization and cultural tourism visualization services in the future. As AI and big data technologies continue to develop, their applications in the cultural heritage field are expected to expand further. For example, predictive analytics could be used to forecast the future deterioration of cultural artifacts and historical sites, resulting in the development of more proactive preservation strategies. Furthermore, the ongoing advancement of AR and VR technologies is expected to enhance the immersive experience for users, enabling them to engage with cultural heritage in even more dynamic and interactive ways. The integration of AI, big data, and immersive technologies is paving the way for a more personalized and sustainable future for digital cultural tourism services in which users can enjoy a deeper connection to culture and heritage. In conclusion, digital cultural tourism services have become a vital force in the integration of the cultural and tourism industries. In the future, cultural tourism integration service platforms are expected to drive the intelligent analysis of cultural heritage data, predictive protection, and multiscenario applications, further advancing the personalized, diverse, and sustainable development of digital cultural heritage and cultural tourism visualization technologies. As AI and big data technologies continue to evolve, their roles in shaping the future of cultural heritage protection and dissemination will become even more significant, ensuring that cultural heritage is preserved and made accessible for generations to come.

Key words: cultural heritage; digital technology; integration of culture and tourism; artificial intelligence (AI); visualization services

0 引言

在当今全球化与信息化的背景下,文化遗产作为一个民族历史的见证、文化传播的载体以及民族精神的象征,其保护与传承尤为重要。文化遗产不仅包含有形的历史建筑、文物遗址,还包括无形的文化传统、民俗、语言和艺术等。随着科技飞速发展,特别是信息技术和数字技术不断进步,文化遗产保护和传承方式逐渐从传统的物理保存和展示模式向数字化、智能化方向转变。文化遗产数字化技术的应用与发展,不仅能够有效提升文化遗产的保存时效、精度,还能为公众提供更丰富的互动体验和展示效果,从而推动文化遗产的创新性应用技术的发展。

综观文化遗产的数字化保护、传承及应用的研究,主要涉及两方面内容,一是文化遗产的数字化保护,二是文化遗产的传承与发展。数字化保护对应的是技术层面的开发,传承与发展对应的是文化与旅游的融合及服务(刘洋和徐振宇,2023)。

文化遗产的数字化是文化遗产保护与传承的基础。随着人工智能、大数据、虚拟现实(virtual reality, VR)和增强现实(augmented reality, AR)等技术的广泛应用,文化遗产的数字化保护与传承已经逐步成为推动文化产业和旅游产业融合发展的关键力量。文化遗产数字化的保护主要包括文化遗产数据采集、表示和存储等技术,其中数据采集主要涉及采集工具、技术与手段的研究,数据表示主要涉及表示的内容、方式及形态的研究,数据的存储主要涉及存储媒体、网络及云服务等技术的研究。进入人工智能快速发展的智能互联网时代,传统的技术手段不断的迭代发展,智能化的技术与手段已经在文化遗产数字化保护及传承等方面得到应用,如高精度三维扫描、高清摄影和自动化的数字建模等手段得以应用,使文化遗产数字化保护技术得到了快速的发展。

文化遗产与旅游产业融合(文旅融合)发展是文化遗产创造性的转化与创新性的发展的有效途径。文化遗产的数字化不仅提高了创造性转化与创新性发展的速度,而且提高了文化服务于经济产业质量与效率,其中可视化服务作为数字文旅服务的重要内容,已经是目前主导地方经济发展的一支重要力量。

近年来,数字文旅的可视化服务已经逐渐实现

从形式服务到内容服务的转变,特别是随着人工智能技术的发展,基于人工智能生成内容(artificial intelligence generated content, AIGC)的文旅融合服务平台在文旅应用和可视化服务领域的应用大放异彩。数字化的文旅服务通常集成了客户端与服务端技术,基于在线的数字文化资源,为B端与C端用户提供更为便捷的内容生成与可视化服务。耿国华等人(2022)指出,通过智能数据处理技术、个性化服务技术与人工智能技术可以提升文化遗产数字资源的整合、共享与再利用效率,以此提高数字文旅服务的智能化和用户体验的个性化水平。这些成果不仅为文化遗产保护提供了技术上的创新路径,还为文化旅游体验的优化提供了有益的参考。

本文围绕文化遗产数字化与数字文旅可视化服务的技术进展,从文化遗产的数字化保护、文旅服务平台和可视化的智能数据处理等3个核心研究方向,对文化遗产数字化及数字文旅可视化服务技术的发展现状与趋势进行系统梳理与分析,为推动文化遗产的数字化保护与传播提供技术支持,并为文旅产业的转型升级和可持续发展提供理论依据与实践指导。本文主要包括以下内容:第1节介绍文化遗产的数字化保护技术,详细探讨文化遗产数字化采集与存储、表示与传播等基本技术,分析人工智能(artificial intelligence, AI)技术赋能文化遗产数字化的创新应用;第2节聚焦数字文旅的可视化服务,探讨虚拟现实与增强现实技术在数字文旅中的应用,以及智能导览系统和全景视频服务的开发现状;第3节重点研究文旅融合服务平台的构建,讨论基于智能算法的个性化推荐系统、文化资源整合与优化技术的应用,通过数字人服务和智能问答系统,提升文化资源的互动性和服务的个性化,结合实际应用案例,分析这些技术在推动文化产业与旅游产业深度融合中的作用,探索数字文化遗产生态系统的发展路径;第4节概括当前文化遗产数字化与数字文旅可视化服务的发展成就与面临的挑战,展望未来人工智能、大数据以及区块链等新兴技术在文旅领域的深度应用趋势,以及技术融合、法律规范和可持续发展的潜在方向。

1 文化遗产的数字化

文化遗产数字化包括文化遗产数据的采集、表

示和存储等技术(吕文婷和蔡晓芬,2024)。数字化采集能够为文化遗产数字化保护和修复提供核心数据要素,是文化遗产数字化的第一步。从数据表示角度分析,文化遗产数字化采集主要分为结构化数据采集与非结构化数据采集。结构化数据采集主要目标是建立固定格式的文化遗产数据库,非结构化数据采集主要经历从二维图像采集到高度复杂的三维建模、虚拟现实等多种技术手段的演进。最初的数字化采集工作集中在通过摄影和录像的方式记录文化遗产,主要目的是进行基本的保存和传播。这些传统的二维记录方式虽然在一定程度上满足了文化遗产的存档需求,但无法全面反映文化遗产的物理细节和历史价值。

随着计算机技术的进步,三维扫描和建模技术逐渐成为文化遗产数字化的核心手段,为文化遗产的保护、展示和传承提供了全新的解决方案(王夏歌和张苏秋,2024)。文化遗产的数字化不仅能够记录和保存有形遗产,还能通过多媒体、虚拟现实等技术手段丰富其展示方式,实现更广泛的公众参与和传播。

1.1 数字化采集与存储技术

文化遗产数字化的核心步骤之一是对遗产信息的采集与存储。早期的文化遗产数字化主要依赖于二维图像记录,如高清摄影、视频记录等,虽然这些技术的应用为文化遗产的存档、展示以及基础研究提供了重要的数据基础,但对于复杂结构的遗产,二维记录技术难以完全捕捉其全貌和细节,无法充分反映遗产的多层次物理特征和历史价值(陈芳芳,2024)。随着技术的发展,三维建模技术和高精度三维扫描逐渐成为文化遗产数字化的重要工具。通过

非侵入式三维扫描技术,文化遗产的结构、形态和材质可被以极高精度进行数字化复制,从而使数字记录更加精准和全面(Murphy等,2022)。

近年来,三维建模技术和高精度三维扫描逐渐成为文化遗产数字化的重要手段。通过非侵入式的三维扫描技术,文化遗产的结构、形态和材质可以以极高的精度得到复制,使文化遗产的数字化记录更加全面和精准(Tsakoumaki等,2023)。2019年数据可视化公司 The Visual Agency 还将达芬奇《Codex Atlanticus》手稿扫描后上传至网站实现数字化展示,允许用户按内容主题、年份等进行网页端交互式浏览。

三维点云技术能够以毫米级的精度捕捉文化遗产的表面细节,并通过计算生成三维模型。如图1所示,这类技术已广泛应用于世界各地的文化遗产保护项目,例如对古建筑的修复、文物的数字化保存等,不仅提升了文物的保存效果,还为后期的学术研究和修复提供了依据。此外,高清摄影与光学扫描技术也在文物的表面纹理捕捉中发挥了重要作用。这些数据可以存储在云端数据库中,以确保信息的长久保存和共享,形成了丰富的文化遗产数字资源库(姚国章和刘增燕,2022)。

文化遗产数字化过程中的高精度采集与存储技术应用,显著推进了遗产资源的长期保存与系统化管理。这些技术通过构建高保真的三维模型和精密的扫描记录,实现了文化遗产的细节再现,提高了结构表示的精准度,增加了数字化呈现形式的多样性,从而显著提升了用户的沉浸式互动体验(Cao,2024)。

文化遗产数据的存储方式经历了从单机模式、

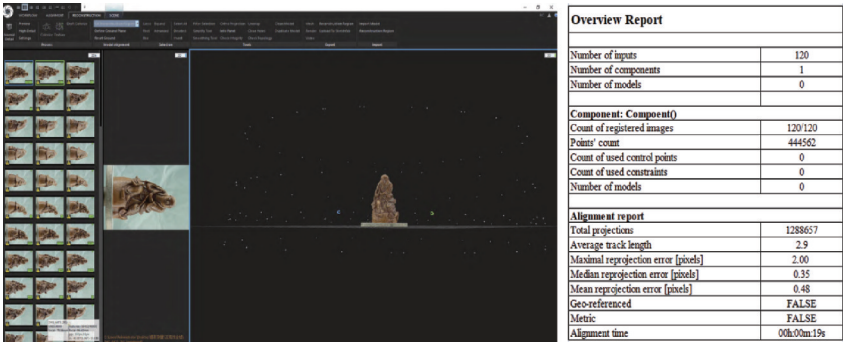


图1 石市竹木雕工艺品《刘海戏金蟾》的三维点云数据与运算报告(王巍等,2022)

Fig. 1 3D point cloud data and computation report of the bamboo and wood carving craft “Liu Hai playing with a golden toad” from Shishi (Wang et al. , 2022)

服务器模式和云服务器存储模式的演化。单机存储模式是数字化保护技术的最低级模式,服务器存储模式有效地扩展了数字化文化遗产的局部或区域的应用,进入互联网及人工智能时代,集约式的云服务器存储模式实现了文化遗产云端存储,为更大区域的应用及文旅融合服务提供了技术保障。

以中国近年来文化遗产的传承与保护为例,习近平总书记多次就文化遗产保护传承作出重要指示批示,强调要坚定文化自信,加强文化遗产保护传承,推动中华优秀传统文化创造性转化、创新性发展(陈联俊和郑维,2024)。文化遗产的数字化不仅是保护,更重要的是传承。随着全球化和现代化的加速推进,文化遗产不仅承载着历史记忆,更是推动社会可持续发展、提升国家文化软实力的重要资源。

1.2 数字化表示与传播技术

除了采集与存储技术,文化遗产的数字化展示方式取得显著进展。虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术的引入,为文化遗产的展示提供了全新的互动体验方式。通过VR技术,用户可以沉浸在虚拟构建的文化遗产场景中,身临其境地参观远离实际地点的文化遗产,深入感受文化的历史背景与价值。例如,在悉尼歌剧院的数字化项目中,通过数字化文档和建筑资料,使用VR技术重现其复杂的建筑施工过程,用户可以体验到这一建筑设计的全貌与施工背后的文化内涵(Cardellicchio等,2024)。

近年来,文化遗产展示也逐步实现从传统的静态展示到动态的沉浸式和交互式体验的转变。在这一趋势下,智能博物馆逐渐兴起,这类博物馆利用数字屏幕、虚拟现实和交互触摸设备等智能化设计,使游客能够自主查询、沉浸式体验展示内容,从而大幅提升观众的参与感和互动体验(郑琦凡,2023)。

通过数字化手段,文化遗产从传统的物理形式向数字形式转变,这种转变不仅延长了文化遗产的生命周期,还通过云端数据资源的共享增强了其传播的灵活性和可达性,使其能融入更多的日常生活场景(范炜和曾蕾,2024)。在此过程中,数据驱动的传播体系逐渐形成,数字化传播不仅是简单地从内容到受众的单一过程,而是包括创意生成、内容设计生产、宣传推广和受众体验在内的全链条传播模式(罗安琪等,2024)。例如,在意大利的文化遗产数字化计划中,通过数字孪生和知识图谱的建设,不仅提升了文化数据的可共享性,还通过虚拟展示、数据

资源开放等方式加强了沉浸式体验(Balzani等,2024)。

尽管数字化带来了前所未有的传播灵活性,数字文化遗产的长期保存是一个全球性挑战,在技术快速革新的背景下如何确保数字数据的可持续性以及数字档案的可用性和完整性,仍然是文化遗产数字化面临的主要技术问题(郭新茹和沈佳,2024)。

为应对这一挑战,一些项目引入FAIR(findable, accessible, interoperable, reusable)原则,通过系统化的存档和规范化的数据格式管理来增强数据的可持续性,并为跨学科应用与跨平台协作奠定技术基础,但后续还需不断完善数据的长期保存与动态展示的需求(Murphy等,2023)。

1.3 AI赋能文化遗产数字化及应用

在文化遗产数字化的背景下,大数据和人工智能(AI)的技术逐渐引入,开启了文化遗产保护的新纪元,如对少数民族文字的文本分析与识别研究受到广泛关注,并取得显著成就,成为人工智能应用研究的一个热点领域(王维兰等,2024)。通过大数据分析,文化遗产的数字资源可以更高效地管理和共享,尤其是在用户行为、访问数据和反馈分析中,大数据技术帮助优化数字化展示的内容和形式。与此同时,研究者能够对大量文化遗产数据进行分析、整理与分类,从而提升数据管理与共享的效率。在数据处理方面,AI技术能够识别出文物表面微小的损伤和退化迹象,并基于机器学习算法预测其未来的退化趋势,为文物的修复和保护提供智能化的解决方案。

通过深度学习算法,AI可以快速分析文物表面的历史损伤并提出修复方案,从而提高文物修复工作的精确性和效率。这类智能化技术的应用大大减少了人为干预中的误差(张建明和高黎娟,2022),提高了修复过程的可靠性,同时也为文化遗产的长期保存提供了技术保障。

1.4 数字资源的融合、共享与挑战

尽管文化遗产数字化技术不断进步,但资源的整合与共享仍然面临诸多挑战。

1)许多文化遗产的数字化项目因缺乏统一的技术标准和数据共享机制而形成“数据孤岛”,不仅限制了跨平台合作,还削弱了数字文化遗产的传播力和影响力(吕文婷和蔡晓芬,2024)。未来的发展需要在技术标准化、法律保护以及数字文化资源的长

期存储与共享机制上取得更多突破,以实现文化遗产的可持续发展。

2)博物馆之间的资源开放度存在不足,许多博物馆对数字资源的开放仅限于少量馆藏,甚至设置较高的使用门槛,例如博物馆要求用户必须获得书面授权方可利用数字资源(刘阳,2022),这一现实问题让许多文化遗产资源未能得到有效利用。

3)多源异构数据的存在增加了整合的复杂性。不同来源、格式和标准的文化遗产数字资源在共享和融合过程中面临着重大挑战,缺乏有效的技术手段解决数据碎片化和语义歧义等问题(赵雪芹等,2023)。

2 数字文旅可视化

随着数字化技术的进步,文化旅游产业迎来深度变革,数字文旅可视化服务逐渐成为提升用户体验、推动文旅融合的重要手段。在中国,各级政府部门积极制定相关政策推动数字化融入文旅产业,且数字经济在其生产总值占比不断提高,文旅数字化成为基本趋势。通过虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、全景视频、智能导览等技术,文化旅游展示方式日益多样化。目前,很多学者聚焦于文旅数字化的研究,特别是关于5G技术、元宇宙和数字创意等与文旅产业深度融合领域(杜兴艳等,2024)。

数字赋能文旅产业的深度融合,促使可视化技术与文旅场景相结合,推动文旅信息的融合与创新,不断增强互动性与沉浸感,提升游客的参与体验(黄震方等,2024),如图2所示,通过搭建“技术嵌入—文旅交融—产业变革—融合共生”的数字赋能文旅融合系统形成文旅产业新形态。

以下从应用现状和实际案例两个方面,分析数字文旅可视化服务的现状与实践。

2.1 虚拟现实与增强现实技术

虚拟现实(VR)技术在文旅领域的应用极大提升了用户体验感。通过高精度三维建模和全景重建技术,虚拟现实能够让用户在虚拟环境中身临其境地体验文化遗产和旅游景点。例如,借助VR技术,游客无需亲临现场即可“参观”历史遗址、博物馆和名胜古迹,沉浸式感受文物的细节和文化背景。这一技术尤其适用于那些地理位置偏远或对保存环境要求较高的遗产保护区,能够实现文化传播与保护

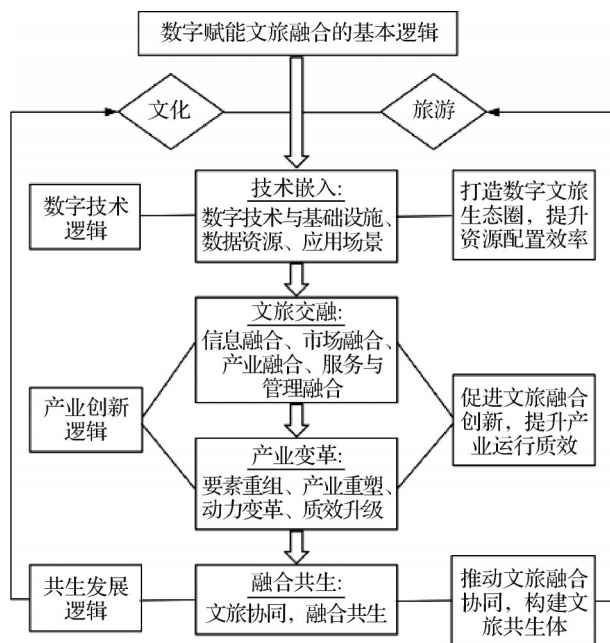


图2 数字赋能文旅融合的基本逻辑(黄震方等,2024)

Fig. 2 The basic logic of digital empowerment in the integration of culture and tourism (Huang et al., 2024)

的双赢。

随着元宇宙概念的兴起,虚拟现实技术在数字文旅中的应用前景更加广阔。元宇宙不仅提供了一个虚拟与现实交融的全新平台,还通过高度沉浸的虚拟场景为用户创造更加个性化和互动的体验。元宇宙为虚拟旅游开辟了新的可能性,用户可以在虚拟平台上参观历史遗址,参观已经消失的文化遗产(张敏等,2019)。

增强现实(AR)技术进一步提升了游客在真实场景中的互动性。通过在实地参观过程中叠加数字信息,AR可以让游客在参观过程中获取更多与文物、景点相关的历史和文化资料。游客在行进过程中,可以通过移动设备或穿戴设备,实时看到文化解说、复原图像和三维动画等内容,在真实场域中增强对文化内涵的理解与沉浸感。此外,AR技术具备较高的开放性和可拓展性,能够与移动互联网、人工智能和地理信息系统等多种技术深度融合,构建起“所见即所得”的文化体验机制。如图3所示,基于定位技术的导览系统可以根据游客的移动路径自动触发AR内容,使导览过程更加智能化与个性化。未来,随着AR硬件的不断轻量化与交互技术的演进,其在智慧文旅中的应用边界将进一步拓展,为文化传播注入更多实时性与现场感。

例如,部分博物馆在展览中使用AR技术,游客

可以通过智能设备看到文物的原始状态或还原的历史场景。这些技术极大丰富了传统展示的形式,增强了文化旅游的趣味性和教育性。

目前这种多维度数字技术成为数字文旅内容释放的新出口,为文化遗产打开沉浸式、强交互“在线、在场”展陈新途径。如图4所示,“基于3D打印和VR

技术的文化遗产传播”项目运用光学定位、三维激光扫描等技术,对云冈石窟进行数字化采集,并将文化遗产按比例进行3D打印复制重现遗产。同时通过构建多人在线的沉浸式交互系统,打造“石窟原大复制品巡展+石窟VR交互体验”的文物新体验,为我国大体量的不可移动文物数字化展示提供模式参考。

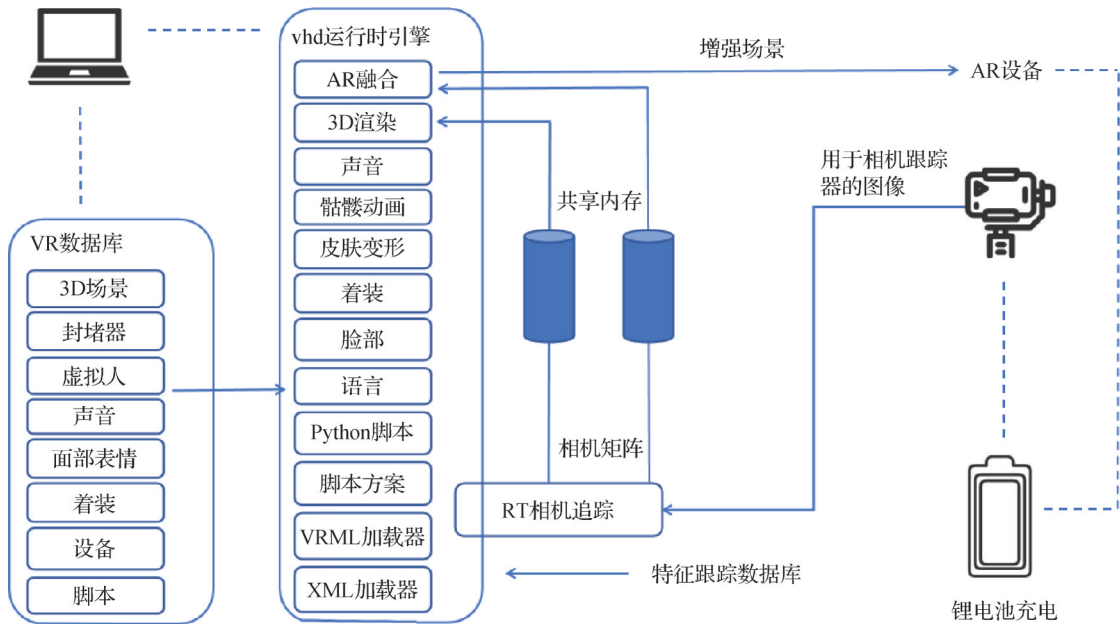


图3 AR内容的生成和显示
Fig. 3 Generation and display of AR content



图4 “基于3D打印和VR技术的文化遗产传播”项目
Fig. 4 The “cultural heritage dissemination based on 3D printing and VR technology” project

2.2 智能导览系统与全景视频服务

智能导览系统是当前数字文旅可视化服务的重要组成部分。通过AI语音技术、智能定位和多语言支持,游客能够获得实时的定制化导览服务。某些文化遗址和博物馆已经通过开发移动应用,提供基于游客位置的语音讲解和个性化推荐,游客可以根据自己的兴趣爱好和游览时间规划参观路线。这种

互动方式不仅提升了游客的自主探索感,还改善了传统导览方式的局限性。近年来,多个数字文旅项目已经取得了显著成效。例如,中国的敦煌莫高窟数字展示中心通过数字化手段,提供了虚拟洞窟参观体验,游客可以通过VR设备,探索无法开放的洞窟内部结构,深入了解敦煌壁画的艺术价值和历史背景。这一项目不仅拓展了文化传播的边界,还为文物保护提供了有力支持。用户在参观虚拟交互场景时,良好的空间感知能够使用户的判断更加准确,使用户在虚拟环境中更有真实的体验(Renner等, 2013)。巴黎卢浮宫博物馆和北京故宫博物院(如图5所示)也纷纷推出数字文旅平台,通过虚拟参观、AR导览等方式,吸引了大量全球游客的关注和参与。这些项目的成功表明,数字文旅可视化服务不仅能够提升文化旅游的吸引力,还能推动文化遗产的全球传播和文化交流(Acke等, 2021)。

此外,数字文旅的叙事空间可以通过时空的跨区域体验进一步提升游客的沉浸感。白晓晴(2024)指

出,数字文旅的沉浸式体验由虚拟技术驱动,通过空间布局与多模态叙事符号的协同,使游客不仅能观察历史场景,还能亲身体验虚拟的文化语境(如图6所示)。这种沉浸式叙事不仅强化了游客的感知体验,还通过时空交错的叙事路径,使游客在不同文化和历史背景中获得连续性的体验感,进一步增强了文旅项目的文化传播效果和参与度。

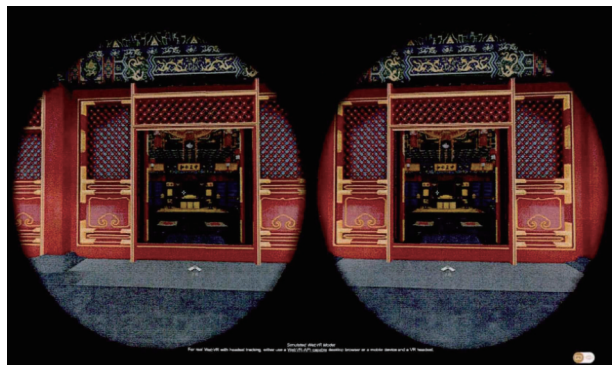


图5 北京故宫博物院《养心殿》VR项目

Fig. 5 The “hall of mental cultivation” VR project of the Palace Museum in Beijing

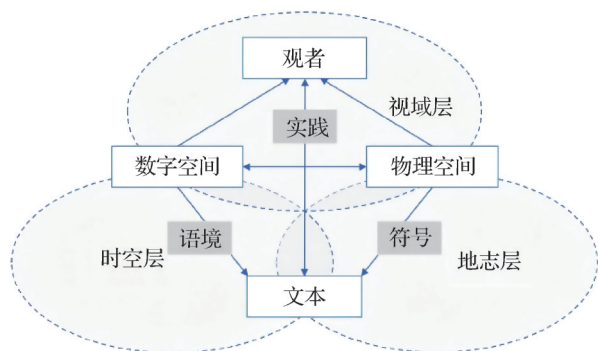


图6 数字文旅空间的叙事组织层次关系

Fig. 6 The hierarchical relationship of narrative organization in digital culture and tourism space

全景视频服务也是近年来数字文旅领域广泛应用的另一重要技术。通过360°全景拍摄和视频处理技术,用户可以通过互联网实时观看景区的全貌,甚至可以通过虚拟漫游功能,远程体验文旅项目的魅力。例如,中国许多著名景点,如长城、故宫等,都已经提供了在线全景参观服务,用户只需通过移动设备便能获得全方位的视角体验。这种无缝衔接的数字文旅体验,打破了传统旅游的时空限制,为文化资源的广泛传播提供了新途径。

2.3 数字文旅中的可视化及个性化推荐服务

随着大数据和人工智能的快速发展,个性化推

荐逐渐成为数字文旅服务的核心功能之一。通过对用户历史行为、兴趣偏好等数据的分析,个性化推荐系统能够提供针对性的旅游路线、文化活动和文物解说等服务。例如,一些数字文旅平台根据用户的历史搜索和访问记录,智能推荐与其兴趣相关的文化遗产或景点,使用户能够在海量的文化资源中快速找到最符合自身需求的内容。这类服务不仅提升了用户体验,还推动了数字文旅平台的内容优化和数据价值的最大化。通过整合地理信息系统(geographic information system, GIS)和物联网(internet of things, IoT)技术,智能导览系统能够根据用户的实时位置和兴趣提供个性化的导览服务(Zhou等, 2021)。另外,游客可以通过移动设备获取文化遗址或博物馆的详细解说信息,实现自主探索和互动学习。这种技术的应用使得传统的文化旅游不再局限于现场参观,用户可以通过数字平台随时随地获得丰富的文化体验。

在数字文旅的未来发展中,随着AI和机器学习技术的进一步成熟,个性化推荐系统将能够更加精准地了解用户的偏好,并提供更加智能化、定制化的旅游体验。这不仅有助于提升游客的满意度,还能有效引导文化旅游产业的创新与发展。

2.4 现存问题与未来挑战

尽管数字文旅可视化服务在多个方面取得了积极成果,然而,现有的服务仍面临一些挑战。首先,用户体验的沉浸感和互动性有待提升。尽管科技保护已经成为文化遗产保护的重要路径,但由于技术在复杂环境下应用时的局限性,在沉浸感和互动性方面,数字化项目的表现效果并未达到预期,导致用户的整体体验感未能实现理想状态(张靖等, 2024)。其次,在数据整合和分析方面智能化水平的提升需要进一步的技术投入和创新,当前文化遗产领域的数字化项目面临数据共享与整合机制不足的问题,现有的智能推荐系统仍难以充分处理复杂的多源数据,这种数据与知识层面的不兼容性限制了智能导览系统的应用,进而影响了用户的个性化体验(杨鑫等, 2024)。未来,随着人工智能、大数据和新兴技术的不断发展,数字文旅可视化服务将在用户体验的深度和广度上取得更多突破。个性化服务的优化、内容的持续丰富以及互动体验的增强,将成为未来数字文旅服务技术发展的重点方向。

3 文旅融合服务平台

文化遗产的数字化为数字文旅的可视化提供了源数据,为了扩展这些源数据的不同应用场景,提升文化遗产数据的应用价值,建设面向不同应用的文

旅融合服务平台成为文化遗产保护传承及应用的重要内容。进入21世纪,AI赋能的数字化的文化遗产在保护、传承及应用发展迅速,面向不同领域的数字化的文化遗产平台不断涌现。图7展示了Elsevier Masson 出版商的 Journal of Cultural Heritage 期刊中对“Platform”关键词进行搜索后的结果。

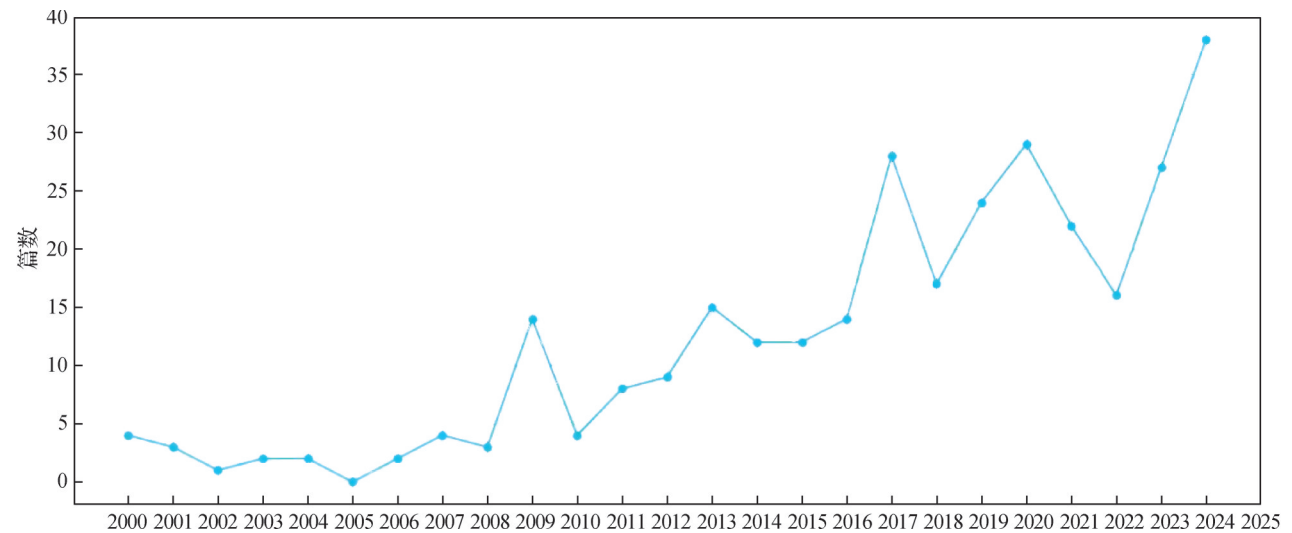


图7 “Journal of Cultural Heritage”期刊中与“Platform”相关的文章
Fig. 7 Articles related to “Platform” in the Journal of Cultural Heritage

本文对国内外文化遗产数字化保护、传承及应用的平台进行了文献的综合调研,并从数字化、可视化及AI赋能的角度进行分析,大致可分为以下3类: 1)面向文物或文化遗产管理部门的通用数字化平台,这类平台通常以保护为目的,利用传统的数字化技术将文化遗产进行数字化的采集与存储。2)面向公众的开放式数字化平台,这类平台通常通过倡导更多公众用户的参与,将需要投入较大的人力资源进行数字化的复杂流程工作开放出来,提高公众参与度,从而提高数字化的工作效率。3)面向文旅服务的开放式平台,这类平台分别可以面向B端的管理部门和C端的消费用户,通过开放的接口,让文化遗产资源的管理部门可以即时上传或修改数据,管理向C端用户的开放权限,让更多的公众用户得到“亲临其境”的体验。鉴于文章篇幅有限,本文重点介绍应用于这3类平台的关键技术及应用情况,主要包括基于AI大模型和智能算法的个性化推荐系统、文化资源整合的有效策略以及数字人服务与智能问答系统在用户交互中的应用。

3.1 AI大模型和机器学习的应用

将AI算法应用于数字化服务平台,可以大幅度提高数据生产效率。如图8所示(Gîrbacia 等, 2024),目前,AI技术越来越多协助于文化遗产的相关任务,人工智能与非物质文化遗产结合的研究数量在逐年增加。

基于AI大模型和机器学习的个性化推荐系统已广泛应用于文化遗产数字化领域。这些系统通过分析用户的行为数据、偏好和历史访问记录,能够实现精准的需求匹配,从而为用户提供更加定制化的文旅体验。

智能算法通过深度学习技术,对用户与系统的每一次互动进行反馈和学习,逐步形成更加智能和精确的推荐模型。这种模型不仅能够识别用户当前的兴趣点,还可以通过分析复杂的行为模式,挖掘出用户潜在的兴趣领域,从而提供个性化的文化活动、展览或景点推荐。

深度学习算法特别擅长处理复杂的多模态数据,能够结合文本、图像和语音等多种信息来源,从中识别出用户的偏好。例如,当用户浏览特定的文

化遗产展览时,系统不仅能够记录用户的点击行为,还可以通过图像识别和语义分析来捕捉用户的深层次兴趣,从而为用户推送更多符合其偏好的内容。通过不断优化算法,这些推荐系统能够自我调整,实现更加精准的个性化服务,进而提高用户的满意度和平台的用户黏性(Gaber等, 2023)。

此外,基于AI技术的推荐系统还具备动态调整的能力。当用户的兴趣或行为发生变化时,系统能够实时更新推荐内容,确保用户始终能够接收到最相关的文化信息。这种智能化、动态化的推荐机制,使得文化遗产的传播更加灵活多样,也为文旅平台

的可持续发展提供了有力支持(Girbacia等, 2024)。

智能推荐技术在文化遗产保护和传播中的应用,极大提高了文化资源的可见性和可访问性,不仅帮助用户发现自己感兴趣的内容,还推动了文化遗产的教育与传播。例如,某些系统通过AI生成个性化的文化解读和导览服务,能够让游客在虚拟参观或实际参观时,获得更加深刻的体验(Gaber等, 2023)。

这些技术的应用表明,AI大模型与智能算法的结合,正在不断推动文化遗产数字化及个性化服务的发展,并为未来的文化旅游产业提供了广阔的创新路径。

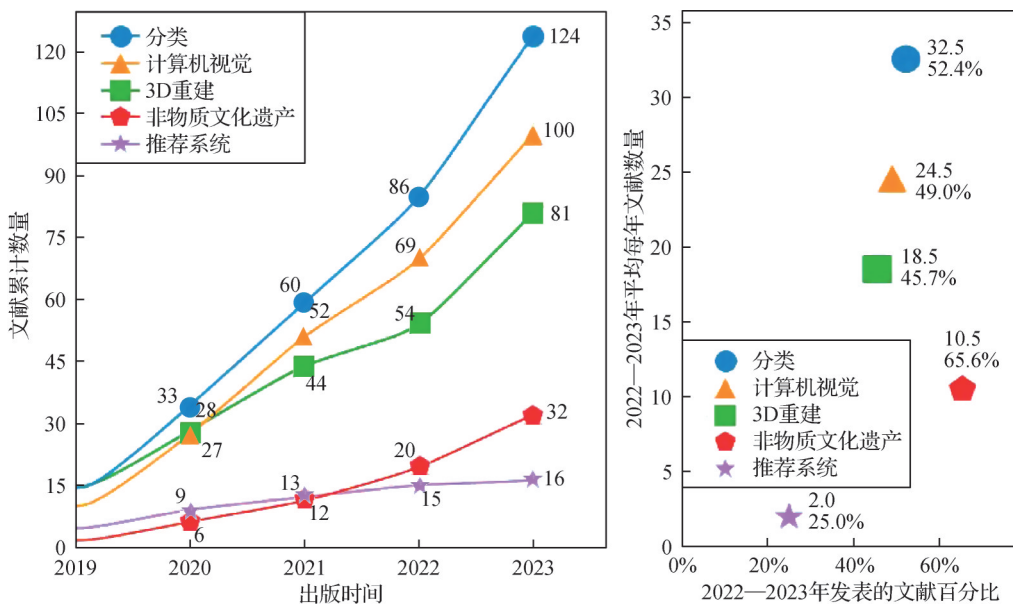


图8 人工智能在文化遗产中的新兴研究趋势

Fig. 8 Emerging research trends of artificial intelligence in cultural heritage

3.2 文化资源整合与优化技术

文化遗产数字化过程中,如何有效整合和优化文化资源是一个重要课题。随着数字文旅服务的普及,各类文化资源如图像、视频、文献和数据的数量急剧增加,形成了丰富的数字资源库。然而,缺乏有效地整合和优化技术,资源之间的信息孤岛问题依然存在(Boutsis等, 2019)。

为了应对这一挑战,许多研究者和实践者开始探索基于大数据分析的文化资源整合技术。如图9所示,通过构建统一的数据标准和共享机制,利用数据挖掘和机器学习等技术,可以实现对文化资源的有效整合。例如,运用数据库技术,可以将文化遗产信息以节点和边的形式进行组织,从而提升数据之间的关联性和可访问性。这种整合不仅有助于提升

资源利用效率,还能够为个性化推荐系统提供更为丰富的数据支持。

此外,智能化的内容生成技术在不断发展。传统的图像复原方法是以退化图像作为已知数据,根据造成图像退化的机制建立正确的关于图像退化的数学模型,从而复原出符合客观真实场景的原始清晰图像。近年来,生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)因其强大的学习图像分布能力被学者广泛用于解决图像复原问题(Goodfellow等, 2014)。

随着各种深度学习模型层出不穷,GAN的各种变体在图像生成领域展现出强大的生成能力。深度卷积生成对抗网络(deep convolutional generative adversarial network, DCGAN)是GAN的一个重要变

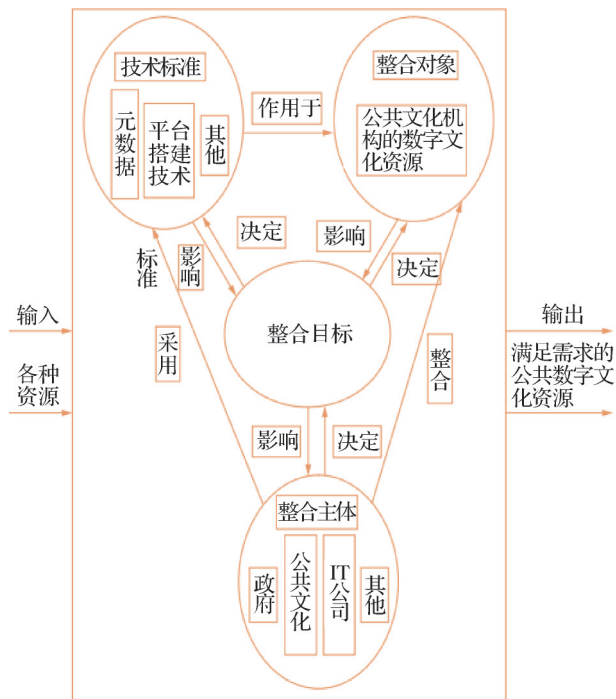


图9 数字文化资源整合模式的要素及其内在逻辑关系 (唐义等,2016)

Fig. 9 Elements and intrinsic logical relationship of the digital cultural resource integration model (Tang et al. , 2016)

体(Radford等, 2016),它使用深度卷积神经网络作为生成器和判别器,使得图像生成更加稳定和逼真(如图10所示)。StyleGAN(Khwanmuang等, 2023)通过引入潜在空间的样式变化来控制图像的生成风格。它在图像生成方面取得了显著的进展,并被广泛用于生成艺术和逼真的人脸图像。借助自然语言处理(natural language processing, NLP)和生成对抗网络(GAN)等技术,文化旅游平台可以实现自动化的内容创作,生成与用户需求相关的文本、图像和视频内容。这种技术的应用不仅提高了内容生产的效率,还为用户提供了更为个性化和丰富的文化体验。

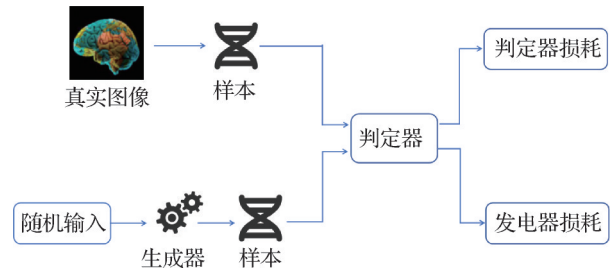


图10 生成对抗网络框图(Aggarwal等,2021)

Fig. 10 Block diagram of generative adversarial network (Aggarwal et al. , 2021)

3.3 数字人服务与智能问答系统的应用

数字技术改变了文化遗产相关学科的工作方式,但从数据生产到知识生产的完整路径探索较少,文化遗产数字化指的是利用数字技术将物理文化遗产以数字形式进行保存和展示。这些技术不仅能够为文物和遗址提供精确的数字化记录,还能通过虚拟重建、智能监控等手段加强遗产的保护和修复(吕燕茹和张利,2016)。表1汇总了数字技术在文化遗产保护中的主要应用和价值。

在数字文旅服务中,数字人服务和智能问答系统的引入为用户交互提供了新的可能性。随着人工智能生成内容(AIGC)的兴起,语音、图像和视频生成技术正在蓬勃发展。微软、Meta以及百度等科技公司对语音生成技术不断投入大量的人力和物力进行研究与推广,使得生成式语音在拟人化、真实化和自然化等方面取得长足进步。其中,语音合成,也称为文本到语音(text-to-speech, TTS)是将给定的文本内容合成为任意或特定说话人风格的语音,从而实现文本到语音的映射(许裕雄等,2024)。数字人作为虚拟的交互式助手,通过深度学习模型,利用语音、文本等方式与用户进行交流,为用户提供实时的文化解读和指导,提升用户交互体验的真实感和自然度,例如数字人能够回答用户在参观过程中的疑问,提供与文物、景点相关的详细信息,从而增强用户的沉浸感和体验。

同时,智能问答系统通过自然语言处理技术,能够理解用户提出的问题,并从海量的文化数据中提取相关信息进行回应。这种系统不仅可以在数字旅游平台中应用,还可以在博物馆、文化遗址的现场服务中发挥重要作用(李德仁,2008)。

在此基础上,多模态数据的引入进一步丰富了用户的互动体验。多模态数据通过整合语音、图像和文本等多种形式的信息,能够为用户提供更加全面的文化解读(Baltrušaitis等, 2019)。例如游客在与数字人互动时,智能问答系统不仅能通过语音回答问题,还能根据用户的需求展示相关的图像或视频资料。这种多模态的数据融合,让用户能够从视觉、听觉等多个维度感知文化内容,增强信息的立体感和交互的自然性,结合智能问答系统的即时反馈,用户可以更加全面了解文化遗产,提升参观体验的同时,也促进了文化遗产的传播和教育。

除了丰富的互动形式,个性化推荐功能也为用

表 1 数字技术在文化遗产保护的主要应用与价值

Table 1 The main applications and values of digital technology in cultural heritage protection

分类	应用领域	应用技术	优势和价值
三维扫描	文物和遗址的数字化存档与修复、虚拟展览与博物馆、文化遗产数字化重建。	激光扫描、摄影测量、结构光扫描技术。	精确记录文物和建筑遗址,辅助虚拟修复与重建,提升数字化展示的沉浸感和互动性。
无人机测绘	大规模文化遗址监测、考古勘探、遗址环境监控、虚拟参观构建。	无人机遥感、航空摄影测量、无人机激光雷达(LiDAR)。	提供广泛的遗址覆盖和高精度数据,持续监控遗址情况,助力遗址保护和考古工作。
人工智能	文物鉴定与修复(破损分析、自动修复建议)、文物管理系统优化、安全监控、智能导览与个性化推荐。	自然语言处理(NLP)技术、计算机视觉(CV)技术、数据挖掘(DM)、语音识别(TTS)。	提高文物修复精度与管理效率,减少人力错误,提升服务质量与游客满意度。
大数据	文化遗产数字化存档与分析、游客行为数据分析、历史文化展示与互动。	数据采集、处理与分析、数据挖掘、可视化平台、大数据平台。	支持文化遗产的精准管理与决策,更好了解游客行为,优化展示和互动内容。
云计算	文物数字资源存储与共享、在线查询与虚拟参观、数据备份与恢复、灾难恢复。	云存储、云安全、云数据库、云计算平台、云集成。	提供大规模数据的安全存储与共享,快速恢复文物数据,降低运营成本与维护风险。
区块链	文物数字身份认证与存证、文物修复透明化、文化遗产项目众筹与数字版权保护。	公有链、私有链、联盟链、智能合约、NFT。	确保文物身份与修复过程不可篡改,追踪捐赠资金与版权使用,增强透明度和信任感。
虚拟现实	文化遗产的虚拟修复与重建、文物虚拟展示、沉浸式文化体验、虚拟博物馆。	VR 设备、虚拟场景创建、沉浸式交互技术、3D 建模。	使文物修复可视化,增强沉浸感与互动性,提升游客的文化体验和学习效果。
增强现实	文物修复辅助、文化遗产讲解、增强现实导览与互动展示、互动式文化教育。	AR 眼镜、图像识别、环境识别、AR 互动技术。	提供生动的文化遗产信息,增强游客的互动性与学习效果,提升展示效果。
物联网	文物环境监测与保护、安全预警、智能导览设备、游客安全管理。	传感器网络、智能监控设备、自动化控制系统、定位技术。	实现文化遗产环境的精准监测,提供实时预警,提升游客参观的安全性与便捷性。

户提供了更贴心的服务。智能问答系统能够根据用户的兴趣和行为模式生成用户画像,从而为其推荐更符合个人喜好的文物或展览内容。系统通过分析用户的提问记录、参观路线和互动习惯,为用户量身定制文化解读与建议。这种个性化的推荐方式,不仅提升了用户的满意度,也增强了文化遗产与参观者之间的情感联系,让文化的传播更加精准、个性化。

与此同时,基于微表情等微反应的情感计算通过深度解析人类情感,助力智能问答系统提供更加精确和个性化的服务。即数字人服务能够通过分析用户的语音语调、面部表情等情感信号,实时调整交互方式(Guo等, 2024)。例如,当用户表现出强烈兴趣时,数字人会提供更深入的解读,而当用户出现困惑时,系统则会通过更加详细的解释帮助用户理解。

这种基于情感的互动不仅提升了交互体验的灵活性,也使得用户能够获得更加贴合其需求的服务,进一步增强了文化传播的效果。

3.4 数字文化遗产生态系统

从生态系统学角度研究数字文化遗产,是近年来的研究热点。在 RURITAGE 项目(Tamborrino等, 2022)中研究了一种面向乡村资源建设的数字生态系统平台 RRE(ruritage resources ecosystem),平台结构如图 11 所示。

RURITAGE 项目是由联合国教科文组织管理、欧盟资助的以乡村文化和自然资源进行数字化建设与保护的文化遗产资源建设项目,这个项目的特色就是将乡村文化遗产和自然资源作为一个生态系统,通过建立在乡村的实验室,为不断变化的文化和自然遗产资源提供可视化的数据管理及应用。从

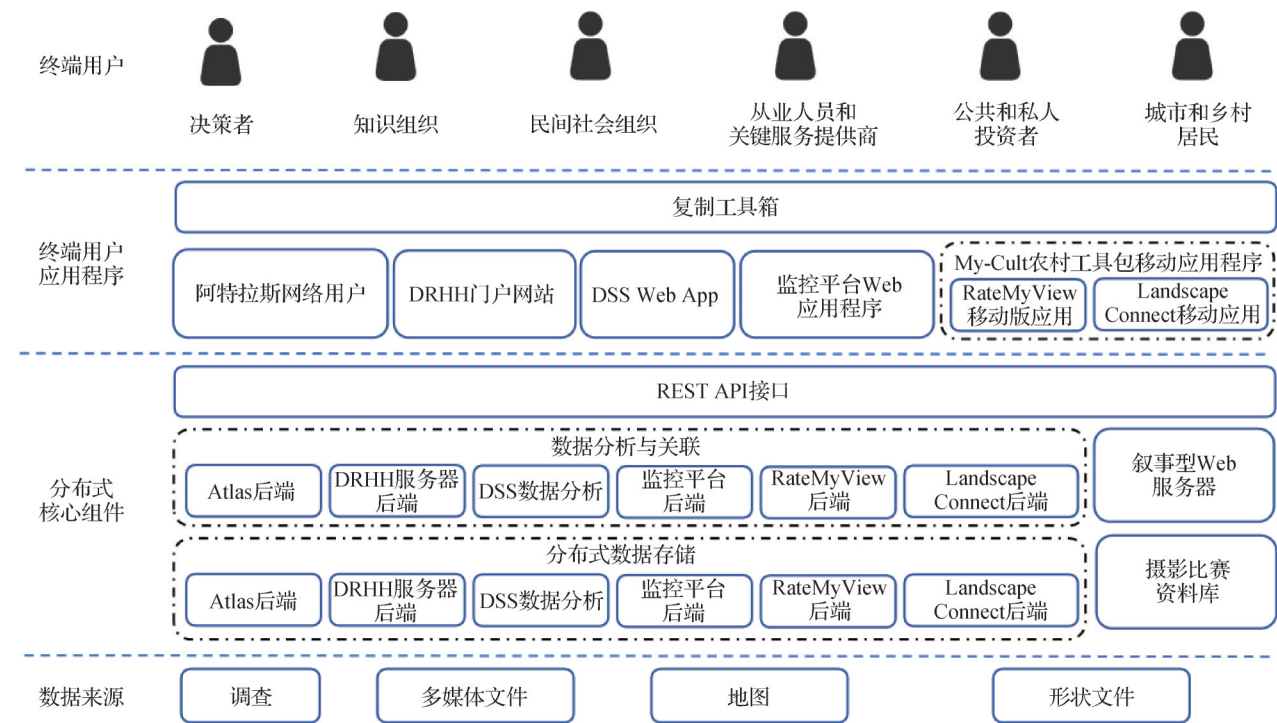


图 11 分布式软件平台架构 (Tamborrino 等, 2022)

Fig. 11 Distributed software platform architecture (Tamborrino et al. , 2022)

图 11 可以看出,平台架构分为4层,最底层是数据源层,其次是分布式计算单元,然后是终端 APP(application),最上层是终端用户,这种多层次的软件架构是目前将文化遗产资源与人工智能、文化旅游等深度融合的典型服务平台架构。

RRE 是一个大型的集数字化方法与应用工具为一体的示范性实验平台,它一方面为用户提供了各种数字化的数据采集与合成工具,同时还可以通过已有数据的学习训练,为新的数据提供可借鉴的数据生成方法。图 12 是基于文本分析模型各类数据资源管理流程示意图。

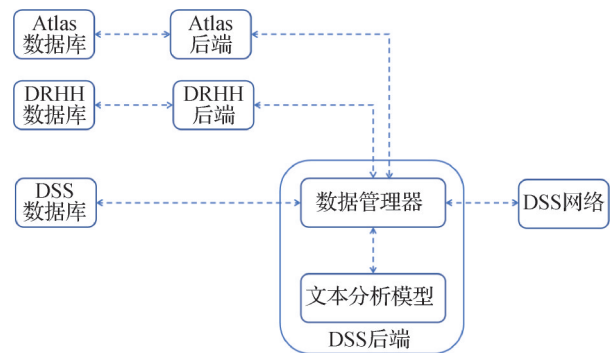


图 12 数据资源管理流程图 (Tamborrino 等, 2022)

Fig. 12 Data resource management process diagram
(Tamborrino et al. , 2022)

4 结语和未来展望

文化遗产作为人类历史的重要组成部分,其保护、传承与创新性利用一直以来都是各国关注的焦点,随着科技的迅速发展,文化遗产数字化及数字文旅可视化服务技术取得了显著进展。本文从技术、应用及挑战多个角度探讨了文化遗产数字化与数字文旅可视化服务,基于现有研究成果,系统梳理了文化遗产数字化在采集、存储、展示与传播等方面的技术进展,并深入剖析了数字技术如何助力文化遗产的创新性应用。通过数字化采集与存储技术,文化遗产的保护和传承得以实现更高的精确度与有效性。通过三维建模、虚拟现实和增强现实等新兴技术的引入,使得文化遗产的展示方式更加丰富,公众的参与度和体验感明显增强 (Zhang 和 Zuo, 2020)。同时,智能数据处理和个性化服务的创新路径为数字文旅服务提供了新的发展动力,通过精准的用户分析与推荐,提升了游客的满意度和文化体验。

一方面,高精度 3D 建模、图像采集、虚拟现实和增强现实等技术的应用,文化遗产的数字记录不仅在细节上达到了前所未有的精确度,也为其展示和传播提供了丰富的渠道。在此基础上,人工智能的

深度融入赋予了文化遗产保护新的内涵。AI的图像识别、机器学习和模式分析技术可以自动化、智能化地完成数据处理,能够快速识别文物的细微损伤和结构变化,并进行实时监测,为保护措施制定提供科学依据。同时,人工智能还可用于文物自动归档、标签标注和分类整理,在文化遗产数据管理中显现出不可替代的作用。通过深度学习和生成对抗网络等算法,AI不仅在文物破损修复、图像重建方面带来了革命性提升,也让文化遗产的复原和展示达到了新的高度。AI系统可以对损坏文物进行自动补全,使缺失的部分得以以高度真实的方式呈现出来,使文物的细节还原更为生动,推动了沉浸式体验的升级。

另一方面,人工智能还带来了展示方式的革新,通过与增强现实、虚拟现实技术结合,文化遗产不再局限于静态展示,而是让观众得以身临其境地感受历史与文化的厚重。AI在多语言解释、智能推荐等方面的应用为全球用户提供了个性化、多样化的体验,在消除文化隔阂的同时提升了用户参与的深度与广度。更为重要的是,文化遗产数据与游戏产业的融合不仅带来了文化传播的新途径,也让沉浸式文化体验和教育成为可能,通过3D建模和情景构建等方式,历史建筑、文物和无形文化得以在游戏场景中复刻,让玩家在娱乐的同时获得文化知识。AI驱动的动态内容生成将使未来的文化传播更加智能,增强了文化内容的互动性,增加了用户的参与感和对文化遗产的认同。

4.1 智能化数据处理与知识关联

文化遗产的数据类型丰富多样,涵盖了图像、文本、音频和视频等多种形式,而传统的数据分析方法往往难以高效整合这些多样化的数据类型,导致文化信息的分散性和缺乏关联性。黄永林和谈国新(2012)深度学习和知识图谱等新兴技术的引入,为文化遗产的保护和传播开辟了新的可能性。

文化遗产的图像数据处理主要基于深度学习的图像识别技术具备高精度识别和解析的能力。图像识别系统通过深度学习模型(如卷积神经网络)能够对文化遗产图像进行自动化分析可以精确捕捉文物的形状、纹理和颜色特征。此外,计算机视觉技术通过多模态处理的集成,增强了文化遗产图像数据的存储和管理效率,有效支持了图像、文本、音频和视频等数据的智能化关联处理(刘茜和彭哲,2024)。

这些技术手段一方面为数字化存档和管理提供了更加完备的支持,另一方面也为后续的文物分析和复原提供了高质量的数据基础。

在文本分析方面,可以利用自然语言处理(NLP)技术解析古籍和非物质文化遗产的文本数据,通过识别文本中的关键概念并形成关联数据集。在文化遗产文献的处理过程中,NLP技术可以从文档中自动提取文化元素,通过图像、文本等多模态数据的整合形成综合性的文化信息,为研究者提供更为丰富的文化遗产背景信息和跨学科支持(侯光明和杜若飞,2024)。这种多模态数据的智能处理方式不仅提高了数据分析效率,还加强了文化资源的深层次信息挖掘,实现了数据的跨平台访问和系统化管理。

通过高效利用人工智能在图像处理、文本分析和内容整合等能力构建文化遗产的知识图谱同时,这也将削弱文化遗产之间存在的“数据孤岛”现象(曾粤亮和吕晓龙,2024)。传统的文化遗产数据常因各类数据库、管理系统的分散而缺乏关联性,不同地区和机构之间的文化数据往往难以互通,通过构建知识图谱能够有效地将孤立的数据整合为系统化的信息体系,从多源数据中挖掘出隐含的联系,使得不同文化遗产数据之间的关系变得更加直观和紧密(王晓光和侯西龙,2023)。非物质文化遗产项目能够建立跨领域的关联数据网络,使得不同项目的内容和背景实现共享与协同,从而促进文化资源的共生和传播。另外,人工智能与知识图谱结合的文化遗产管理模式还大大促进了数据的跨平台共享和协同。这意味着不同地区的文化机构能够基于同一知识图谱平台共享数据,形成覆盖更大范围的文化遗产数据集群,为文化遗产的全球保护和传播提供资源保障。从而促进跨文化理解与交流,这不仅有助于保护世界文化遗产,还能推动国际间的学术合作和政策制定。

4.2 个性化呈现与赋能传播

当前文化遗产在传播仍面临诸多瓶颈,目前传统的文化遗产呈现缺乏互动性和生动性,难以满足信息时代下用户对多样化、体验性学习的需求,这种单一的呈现方式让受众难以与文化内容建立深层的情感连接,削弱了文化遗产的教育吸引力与有效性。另一方面,文化遗产所涉及的知识体系庞杂,通常涵盖深厚的历史背景、地域特征以及多层次的文化内

涵。然而,当前的教育模式往往缺乏系统化的知识组织与解读框架,导致受众难以有效理解文化遗产的历史脉络及其复杂性。

在未来,人工智能技术在文化遗产传播中的应用将继续推动个性化和多模态传播的发展,逐步形成更智能、更互动的文化教育体验(崔伟等,2023)。随着用户数据积累的增加,AI系统将能够更细致地刻画出个体用户的兴趣和行为模式,逐渐实现“深层个性化”的传播,即不仅仅基于用户的表面行为数据(如浏览记录、点击历史),还会通过情绪识别、偏好预测等更复杂的分析模型,深入洞察用户的文化理解水平和学习需求,当受众在查看某个历史文物时,系统会根据用户的交互记录,自动匹配并推荐相关的背景故事、历史影像等信息,实现精确和富有层次的内容推荐。这也意味着文化遗产传播将更具针对性,能够满足用户的多样化的需求。

在增强现实(AR)、虚拟现实(VR)等技术的推动下,文化内容的展示已从单一图像和文本的静态传播,转变为多感官互动的沉浸式体验(赵宇翔和练靖雯,2021)。AI结合3D成像技术、影像识别和自然语言处理,使得文物、历史建筑以及非物质文化遗产等在虚拟环境中得以重现。用户不仅能在虚拟空间中观察到3D复原的古代建筑,还可以通过语音解说和触觉反馈获取历史背景和文化故事的相关信息(张志安和吕伟松,2024)。未来的AI技术将不仅限于现有的AR和VR形式,还会引入更加先进的混合现实和扩展现实技术。通过这些技术,文化遗产的展示将从二维和三维的视觉呈现延伸到更多维度的沉浸式体验。用户可能通过手势识别、触觉反馈,甚至生物反馈等手段实现与文化遗产的“全身交互”,这种高维度的互动使得用户能够在虚拟环境中真实地触摸、感知文化遗产的纹理和材质,进一步增强文化传播的体验感。这种沉浸体验不仅能激发用户的探索兴趣,也能让用户能够对文化遗产有着更深刻的理解。

此外,知识图谱和情感计算技术在未来实现进一步整合,这也意味着文化遗产知识体系的传播不仅停留在信息传递层面,还能够基于用户的学习进度和理解深度自动调整内容。当用户了解某一历史事件的相关文物时,系统可以动态关联更多层次的背景资料,并结合情绪分析向用户推荐具有情感价值的相关内容,如文物背后的历史人物故事或与事件相似的跨文化视角,使得文化遗产传播更具教育

启发性和情感共鸣。通过这种方式,用户不仅可以学习到文化知识,更可以在情感上与历史文化产生共鸣。

AI的不断进步将逐渐实现文化遗产传播中的跨平台数据共享和知识协同。未来的文化遗产传播将不仅依赖单一数据库,而是能够从不同文化平台、研究机构和教育资源中即时获取内容,通过构建全球化、开放式的文化遗产知识网络实现资源整合。这种平台化协作将使文化遗产传播更加普及化,甚至让用户通过移动设备或智能穿戴设备随时随地访问虚拟文物、参与线上文化活动,并在全球范围内共享文化体验。这种智能化、跨学科和跨文化的传播将有效推动文化遗产教育和保护的全球化进程,使得文化遗产在信息时代中得到广泛、持续地传播和认知。

4.3 文化遗产的智能化分析与预测性保护

文化遗产的智能化分析与预测性保护是数字化保护和管理领域中的关键发展方向。借助大数据与人工智能的深度结合,文化遗产保护机构能够从宏观到微观层面全面提升遗产的监测和管理水平,实现更加高效、科学的预测性保护。

在实际应用中,人工智能和大数据的整合使预测性保护从概念转变为具有实际效用的技术手段(王怀壮和曹盛盛,2023)。机器学习和深度学习模型可以处理庞大的历史数据集,包括文物的材质、位置和年代等基本信息,以及其在不同环境条件下的损坏记录和修复历史。通过分析这些数据,人工智能模型能够建立文化遗产的“健康档案”,从而识别并预估文物在特定条件下的损伤风险。例如,在一些具有极高历史和艺术价值的古建筑保护中,预测性保护技术能够检测出建筑微小的裂缝或色彩变化。通过预测模型计算出可能的损坏速度,AI系统能够提前发出警示,辅助保护人员采取必要的加固措施,从而避免灾难性损坏。

此外,外部环境条件对文化遗产的影响也不可忽视,尤其是温湿度、光照强度和空气污染等物理环境因素。借助人工智能系统,文化遗产保护机构可以实时收集环境数据,并对这些因素对文化资产的潜在威胁进行深度分析。例如,当系统检测到湿度或温度的突然变化时,AI可以快速评估这种变化对文物的可能影响,并及时向保护人员发出警报,建议采取除湿或降温等防护措施,以降低环境突变带来

的损坏风险(Luther等, 2023)。长期来看,这种环境监测与预测机制不仅能显著延长文化遗产的保存寿命,还能减少意外损害的发生和高成本修复的需求。

智能化的预测性保护还能够大幅提升保护资源的分配与利用效率。传统的文物保护多以周期性维护为主,而通过智能化分析,维护策略能够更加具备针对性。AI系统通过对文物损坏风险的精确预判,识别出高风险文物或区域,从而协助管理者合理分配资源,集中力量对重要区域或高风险文物进行重点保护。这一策略不仅提升了资源利用率,还有效地降低了保护成本。尤其在保护资源有限的情况下,预测性保护能够帮助管理者做出科学决策,推进保护工作的精准化和高效化(Leissner等, 2015)。

随着技术的进一步发展,预测性保护有望应用于更广泛的文化资产类型,包括古籍、石雕和壁画等多样化的文化遗产。通过不同材质和类型的历史数据积累,AI系统将能够建立更加全面和细化的模型,实现对多种文化资产的同时监测与保护。同时,预测性保护研究还将进一步强调模型的可解释性和可操作性,确保保护人员能够理解AI提供的风险评估结果,并迅速做出应对措施。通过这种智能化和实用性的结合,文化遗产的预测性保护将形成一个动态反馈系统,使文化遗产管理朝着更加科学和智能化的方向发展(Casillo等, 2024)。

4.4 生态化与可持续数字化设计

在未来的文化遗产数字化发展中。生态化与可持续数字化设计将会成为核心方向,以应对文化保护和环境保护的双重挑战。随着全球对可持续发展的重视,各国在文化遗产保护项目中也逐渐意识到数字化技术手段所带来的资源消耗问题。因此,绿色设计和低能耗优化已成为数字化保护系统的重要目标,通过更加生态友好的方法将文化遗产数字化,推动其长期地有效保护和传播(蔡静盈, 2024)。

数字化设备和展示平台的能耗问题成为关注重点。文化遗产的数字化过程通常需要大量的3D扫描、图像采集和数据存储设备,而这些技术在长期运行中会消耗大量电力资源,导致碳排放。De Luca等人(2011)的研究指出,3D扫描和图像采集设备的能效优化,可以通过引入节能型芯片和传感器显著降低功耗(De Luca等, 2011)。在展示平台上引入动态电源管理系统、自适应亮度调节等节能措施,不仅可以降低长期能耗,还可以在不影响展示效果的前

提下提升设备的使用寿命。

在数据处理方面,低能耗算法和数据优化设计将成为文化遗产数字化保护中的关键技术。文化遗产的数字化通常涉及大量数据处理,尤其是3D建模和虚拟现实渲染等任务。研究表明,通过分布式计算和轻量化算法的结合,可以在数据质量不受影响的情况下减少处理时间和能源需求。例如,世界文化遗产组织如联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)已逐步建立世界文化遗产数据共享系统,各国文化机构通过共享数据库可以在减少设备投入的情况下获取高质量的数字资源,从而促进文化遗产的全球传播。这一资源循环利用的模式不仅提高了数字化项目的可持续性,也促进了跨国文化交流(Henriques等, 2017)。

生态化设计的思路还强调数字化保护和可持续发展目标的深度融合,以确保数字资源的长期有效利用。在未来的数字化保护项目中,生命周期管理理念将被进一步推广,即从设备和系统的可回收性、耐用性等方面综合考虑,尽可能避免频繁的硬件更换和过度资源消耗。

生态化的文化遗产保护项目不仅旨在实现行业内部的节能降耗,还能传递绿色保护的理念,提高公众对环保的认识。通过公开展示节能和可持续方面的成效,文化遗产数字化项目将成为推广绿色文化保护的有效载体。未来的文化遗产数字化项目将不仅仅是对历史遗产的保护手段,也会成为推动生态文明建设的象征和示范(Loulanski等, 2011)。

4.5 AI赋能文化遗产的多维盈利路径

在数字化浪潮下,人工智能正深度赋能文化遗产,不仅推动了文化遗产的创新模式,也为其开辟了多元化的盈利路径。NFT(non-fungible token)技术和区块链结合带来了新的盈利模式和传播形式。NFT市场通过链上加密确保了虚拟藏品的唯一性和不可篡改性,从而赋予了文化遗产数字藏品的收藏和交易价值(张琪和江高岸, 2024)。博物馆和文化遗产机构可以将文物的3D模型或虚拟展览门票铸造成NFT供用户购买,用户则能以此拥有独特的数字资产,并有机会在市场上进行拍卖或二次销售,实现长期的价值增长。在未来,通过结合VR/AR增强现实技术,文化遗产NFT与用户的互动性体验进一步提升。用户可以借助AR技术在现实中“观看”自

己的文化遗产 NFT。

这类数字藏品能够通过区块链的透明性保证买家的信任,使文化遗产在数字环境下得到更广泛的传播和保存。研究显示,基于区块链的虚拟藏品市场不仅让用户获得具有稀缺性和收藏价值的资产,还能支持用户在全球范围内随时随地访问这些数字化的文化内容,促进文化知识的传播。NFT 的引入还使得博物馆和文化机构能够建立新的盈利渠道,如通过拍卖或分阶段发布珍贵文物的数字版本,吸引全球的收藏者和爱好者。通过保障数字资产的权属、可追溯性和稀缺性,文化遗产数字藏品将得以实现价值的长期增值和全球范围的传播,极大拓宽了文化传播的场景与经济模式,为未来数字文化市场的繁荣提供了有力支持(付丽霞和何羽丽,2024)。

在人工智能和文化遗产的融合发展中,以文化遗产为内核的游戏也将成为重要的盈利途径(Innocente 等, 2023)。首先,文化遗产游戏借助人工智能识别和分析用户的偏好,能够为用户提供个性化的互动体验,此外通过 3D 模型、音频和视频的多样化形式呈现,让用户在虚拟环境中互动体验历史场景和文物细节。以中国非物质文化遗产为主题的游戏《黑神话:悟空》为例,该游戏通过精致的 3D 建模和沉浸式语音解说,将经典的《西游记》故事与中国传统文化元素深度融合,使用户能够在虚拟空间中体验中国传统神话的独特魅力和民族工艺的艺术表现。用户在游戏中不仅能领略到逼真的场景设计和精美的角色造型,还能深入了解中国传统文化中的神话传说和武术技艺,从而获得深度沉浸的文化体验。通过游戏中的挑战和奖励机制实现了教育与娱乐的有效平衡。游戏中的积分、徽章、排行榜等激励机制,不仅提高了用户的参与度,还通过潜移默化的方式实现了教育与传播目标。在用户的互动过程中,文化遗产知识自然融入游戏规则和故事情节也进一步强化用户对文化内容的记忆和理解(Rallis 等, 2022)。

NFT、VR 和 AI 等创新技术实现了文化遗产与现代生活的深度融合。这种融合不仅扩大了文化遗产的传播范围,也将传统文化资源转化为可持续的数字资产和经济资源。未来,随着技术的不断发展,文化遗产的数字化、互动化和个性化体验将愈加丰富,在此过程中,文化遗产不再仅是历史的印记,更成为全球共享的文化资源和连接不同文明的桥梁。

然而,尽管取得了一系列成就,当前文化遗产数字化和数字文旅服务仍面临一些挑战,包括技术标准不统一、资源整合与共享困难、用户体验的进一步提升等(Zhang 等, 2024)。这些问题限制了文化遗产数字化技术的广泛应用及其可持续发展。因此,在这一过程中,跨学科合作的需求愈发凸显,文化遗产保护不仅需要信息技术的支持,更依赖于历史学、考古学、法律和社会学的共同努力,这种多学科的深度融合将为文化遗产的保护与传承带来更深层次的保障。尽管文化遗产数字化和 AI 应用在保护与传播方面成效显著,但标准不一、知识产权保护以及数据共享难度大等问题依然是未来发展中的重大挑战。

展望未来,文化遗产数字化及数字文旅可视化服务技术的发展将持续受到社会发展技术进步和人类需求等多种趋势推动。随着人工智能、大数据和区块链等新兴技术的不断发展,文化遗产的数字化和文旅服务将实现更高程度的技术融合。这将使得文化资源的管理、保护和传播更加高效与智能化。未来的数字文旅服务将更加关注用户体验,通过深度分析用户行为与需求,提供更为精准的个性化推荐与定制化服务。增强现实和虚拟现实技术将继续推动沉浸式体验的发展,使游客在文化探索中获得更为丰富的感受。此外,文化遗产的数字化与传播也将强调可持续发展,特别是在数字资源的长期存储与共享方面。通过跨界合作,整合不同领域的资源与技术,可以推动文化遗产的活化利用,促进文化产业的多元发展(Chen 等, 2024)。同时,随着文化遗产数字化的深入,相关法律法规和伦理规范的建立显得尤为重要,保护文化遗产的知识产权和数字资源的合法使用,将是未来发展的重要课题。

致谢: 本文由中国图象图形学学会数字文化遗产专业委员会组织撰写,该专业委员会链接为 <https://www.csig.org.cn/16/202011/49337.html>, 在此表示感谢。

参考文献(Reference)

- Acke L, De Vis K, Verwulgen S and Verlinden J. 2021. Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration. *Journal of Cultural Heritage*, 49: 272-288 [DOI: 10.1016/j.culher.2020.12.003]
- Aggarwal A, Mittal M and Battineni G. 2021. Generative adversarial net-

- work: an overview of theory and applications. *International Journal of Information Management Data Insights*, 1(1): #100004 [DOI: 10.1016/j.jjime.2020.100004]
- Bai X Q. 2024. Research on immersive narratives in digital cultural tourism spaces. *Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences)*, (4): 35-44 (白晓晴. 2024. 数字文旅空间的沉浸叙事研究. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, (4): 35-44) [DOI: 10.19836/j.cnki.37-1100/c.2024.04.004]
- Baltrušaitis T, Ahuja C and Morency L P. 2019. Multimodal machine learning: a survey and taxonomy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(2): 423-443 [DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2798607]
- Balzani R, Barzaghi S, Bitelli G, Bonifazi F, Bordignon A, Cipriani L, Colitti S, Collina F, Daquino M, Fabbri F, Fanini B, Fantini F, Ferdani D, Fiorini G, Formia E, Forte A, Giacomini F, Girelli V A, Gualandi B, Heibi I, Iannucci A, Del Fà R M, Massari A, Moretti A, Peroni S, Pescarin S, Renda G, Ronchi D, Sullini M, Tini M A, Tomasi F, Travaglini L and Vittuari L. 2024. Saving temporary exhibitions in virtual environments: the digital renaissance of Ulisse Aldrovandi — Acquisition and digitisation of cultural heritage objects. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 32: #00309 [DOI: 10.1016/j.daach.2023.e00309]
- Boutsis A M, Ioannidis C and Soile S. 2019. An integrated approach to 3D web visualization of cultural heritage heterogeneous datasets. *Remote Sensing*, 11(21): #2508 [DOI: 10.3390/rs11212508]
- Cai J Y. 2024. Revitalization and renewal of cultural heritage: references from the sustainable management of the British Stonehenge Landscape heritage. *Huazhong Architecture*, 42(4): 25-28 (蔡静盈. 2024. 文化遗产的活化更新——英国巨石阵景观遗产可持续管理的借鉴. *华中建筑*, 42(4): 25-28) [DOI: 10.13942/j.cnki.hzjz.2024.04.013]
- Cao Y H, Qu X L and Chen X F. 2024. Metaverse application, flow experience, and Gen-Zers' participation intention of intangible cultural heritage communication. *Data Science and Management*, 7(2): 144-153 [DOI: 10.1016/j.dsm.2023.12.004]
- Cardellicchio L, Stracchi P and Globa A. 2024. Digital heritage construction: testing the heritage value of construction documentation and building processes through virtual reality. *Frontiers of Architectural Research*, 13(5): 1039-1055 [DOI: 10.1016/j.foar.2024.02.012]
- Casillo M, Colace F, Gaeta R, Lorusso A, Santaniello D and Valentino C. 2024. Revolutionizing cultural heritage preservation: an innovative IoT-based framework for protecting historical buildings. *Evolutionary Intelligence*, 17: 3815-3831 [DOI: 10.1007/s12065-024-00959-y]
- Chen F F. 2024. Research on the digitalization construction of ancient books in public libraries driven by digital intelligence technology. *Library Work and Study*, 6: 52-58, 80 (陈芳芳. 2024. 数智技术驱动下公共图书馆古籍数字化建设研究. *图书馆工作与研究*, (6): 52-58, 80) [DOI: 10.16384/j.cnki.lwas.2024.06.007]
- Chen L J and Zheng W. 2024. The logical way and value leadership of Xi Jinping's Cultural Thought. *Jinan Journal (Philosophy and Social Science Edition)*, 46(9): 13-25 (陈联俊, 郑维. 2024. 习近平文化思想的逻辑理路与价值引领. *暨南学报(哲学社会科学版)*, 46(9): 13-25) [DOI: 10.11778/j.jnxb.20241019]
- Chen S H, Tian Y S and Pei S Y. 2024. Technological use from the perspective of cultural heritage environment: augmented reality technology and formation mechanism of heritage-responsibility behaviors of tourists. *Sustainability*, 16(18): #8261 [DOI: 10.3390/su16188261]
- Cui W, Xiong Y P, Xiang W and Wang L. 2023. Application principle and application scenario analysis of artificial intelligence technology in audio and video file management. *Beijing Archives*, (12): 30-32. (崔伟, 熊延萍, 项伟, 王雷. 2023. 人工智能技术在音视频档案管理中的应用原则及应用场景分析. *北京档案*, (12): 30-32)
- De Luca L, Busayarat C, Stefani C, Véron P and Florenzano M. 2011. A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage. *Computers and Graphics*, 35(2): 227-241 [DOI: 10.1016/j.cag.2010.11.009]
- Du X Y, Chen B H, Chen L Y and Lai D T. 2024. Hot spots, trends and prospects of domestic digital cultural tourism research: a visual analysis based on CiteSpace. *Straits Science*, (3): 128-131, 139. (杜兴艳, 陈炳豪, 陈李妍, 赖丹恬. 2024. 国内数字文旅研究热点、趋势与展望——基于 CiteSpace 的可视化分析. *海峡科学*, 3: 128-131, 139)
- Fan W and Zeng L. 2024. Exploring the generation path of smart data for the activation and utilization of cultural heritage in the new era of AI. *Journal of Library Science in China*, 50(2): 4-29 (范炜, 曾蕾. 2024. AI 新时代面向文化遗产活化利用的智慧数据生成路径探析. *中国图书馆学报*, 50(2): 4-29) [DOI: 10.13530/j.cnki.jlis.2024010]
- Fu L X and He Y L. 2024. The practical foundation, intrinsic risks, and regulatory pathways for the development of non-fungible token (NFT) digital collections in museums. *Southeast Culture*, (3): 170-177 (付丽霞, 何羽丽. 2024. 博物馆非同质化权证数字藏品开发的现实基础、内生风险及规制路径. *东南文化*, (3): 170-177)
- Gaber J A, Youssef S M and Fathalla K M. 2023. The role of artificial intelligence and machine learning in preserving cultural heritage and art works via virtual restoration. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-1-W1-2023: 185-190 [DOI: 10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-185-2023]
- Geng G H, He X L, Wang M L, Li K and He X W. 2022. Research progress on key technologies of cultural heritage activation. *Journal of Chinese Image and Graphics*, 27(6): 1988-2007 (耿国华, 何雪磊, 王美丽, 李康, 贺小伟. 2022. 文化遗产活化关键技术

- 研究进展. 中国图象图形学报, 27(6): 1988-2007 [DOI: 10.11834/jig.220198]
- Gîrbacia F. 2024. An analysis of research trends for using artificial intelligence in cultural heritage. *Electronics*, 13(18): #3738 [DOI: 10.3390/electronics13183738]
- Goodfellow I J, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, Courville A and Bengio Y. 2014. Generative adversarial nets//*Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Montreal, Canada: MIT Press: 2672-2680
- Guo D, Li K, Hu B, Zhang Y and Wang M. 2024. Benchmarking micro-action recognition: dataset, methods, and applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 34(7): 6238-6252 [DOI: 10.1109/TCSVT.2024.3358415]
- Guo X R and Shen J. 2024. An impact analysis on digital dissemination of intangible cultural heritage from the perspective of value chain. *Southeast Academic Research*, (3): 226-236 (郭新茹, 沈佳. 2024. 价值链视角下非物质文化遗产数字化传播的影响分析. 东南学术, (3): 226-236) [DOI: 10.13658/j.cnki.sar.2024.03.013]
- Henriques M H and Brilha J. 2017. UNESCO Global Geoparks: a strategy towards global understanding and sustainability. *Episodes*, 40(4): 349-355 [DOI: 10.18814/epiiugs/2017/v40i4/017036]
- Hou G M and Du R F. 2024. From story generation program to large language model: the history and practice of artificial intelligence screenwriting. *Film Literature*, 2024, (14): 3-14 (侯光明, 杜若飞. 2024. 从故事生成程序到大语言模型: 人工智能编剧创作的历史与实践. 电影文学, (14): 3-14) [DOI: 10.3969/j.issn.0495-5692.2024.14.002]
- Huang Y L and Tan G X. 2012. Research on digital protection and development of intangible cultural heritage in China. *Journal of Central China Normal University (Humanities and Social Sciences Edition)*, 2012, 51(2): 49-55 (黄永林, 谈国新. 2012. 中国非物质文化遗产数字化保护与开发研究. 华中师范大学学报(人文社会科学版), 51(2): 49-55) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-2456.2012.02.007]
- Huang Z F, Zhang Z A, Li T, Hou G L, Jin C and Zhang C. 2024. Digital empowerment for the deep integration of culture and tourism: theoretical logic and research framework. *Tourism Science*, 38(1): 1-16 (黄震方, 张子昂, 李涛, 侯国林, 靳诚, 张郴. 2024. 数字赋能文旅深度融合的理论逻辑与研究框架. 旅游科学, 38(1): 1-16) [DOI: 10.16323/j.cnki.lykx.20231116.001]
- Innocente C, Ulrich L, Moos S and Vezzetti E. 2023. A framework study on the use of immersive XR technologies in the cultural heritage domain. *Journal of Cultural Heritage*, 62: 268-283 [DOI: 10.1016/j.culher.2023.06.001]
- Khwanmuang S, Phongthawee P, Sangkloy P and Suwajanakorn S. 2023. StyleGAN salon: multi-view latent optimization for pose-invariant hairstyle transfer//*Proceedings of 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Vancouver, Canada: IEEE: 8609-8618 [DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00832]
- Leissner J, Kilian R, Kotova L, Jacob D, Mikolajewicz U, Broström T, Ashley-Smith J, Schellen H L, Martens M, van Schijndel J, Antretter F, Winkler M, Bertolin C, Camuffo D, Simeunovic G and Vyhřlidal T. 2015. Climate for Culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations. *Heritage Science*, 3: #38 [DOI: 10.1186/s40494-015-0067-9]
- Li D R. 2008. The application of virtual reality technology to cultural heritage protection. *Journal of Yunnan Normal University (Humanities and Social Sciences Edition)*, 40(4): 1-7 (李德仁. 2008. 虚拟现实技术在文化遗产保护中的应用. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 40(4): 1-7) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-5110.2008.04.001]
- Liu Q and Peng Z. 2024. Transformation of video creation: intelligent technology leads a new model of human-machine collaboration and content production. *Chinese Editor*, (10): 88-96 (刘茜, 彭哲. 2024. 影像创作的变革: 智能技术引领人机协作新模式及内容生产. 中国编辑, (10): 88-96)
- Liu Y. 2022. The revitalization of digital resources of museum collections in China: learning from Japan's building a digital archive society strategy. *Southeast Culture*, (6): 146-153 (刘阳. 2022. 我国博物馆藏品数字资源活化的困境与对策——来自日本构建数字档案社会的启示. 东南文化, (6): 146-153) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-179X.2022.06.018]
- Liu Y and Xu Z Y. 2023. Culture and tourism digitization: mechanism, challenges and countermeasures. *Qinghai Social Sciences*, (2): 80-93 (刘洋, 徐振宇. 2023. 文旅数字化的内涵演绎、现实挑战与推进机制. 青海社会科学, (2): 80-93) [DOI: 10.14154/j.cnki.qss.2023.02.013]
- Loulanski T and Loulanski V. 2011. The sustainable integration of cultural heritage and tourism: a meta-study. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(7): 837-862 [DOI: 10.1080/09669582.2011.553286]
- Luo A Q, Liu J J and Zheng J M. 2024. A review of research on the digitalization of cultural heritage at home and abroad in 2023. *Library Tribune*, 44(10): 72-82 (罗安琪, 刘佳静, 郑建明. 2024. 2023年国内外文化遗产数字化研究述评. 图书馆论坛, 44(10): 72-82) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1167.2024.10.008]
- Luther W, Baloian N, Biella D and Sacher D. 2023. Digital twins and enabling technologies in museums and cultural heritage: an overview. *Sensors*, 23(3): #1583 [DOI: 10.3390/s23031583]
- Lyu W T and Cai X F. 2024. "Archives + Cultural Industry" in the context of national cultural digitalization strategy: development opportunities, operation mode and key issues. *Archives Science Study*, (3): 87-93 (吕文婷, 蔡晓芬. 2024. 国家文化数字化战略背景下的“档案+文化产业”: 发展契机、运作模式与关键问题. 档案学研究, (3): 87-93) [DOI: 10.16065/j.cnki.issn1002-1620.2024.

- 03.011]
- Lyu Y R and Zhang L. 2016. Innovative applications of multimedia technologies in digital display for intangible cultural heritage. *Packaging Engineering*, 37(10): 26-30 (吕燕茹, 张利. 2016. 新媒体技术在非物质文化遗产数字化展示中的创新应用. *包装工程*, 37(10): 26-30) [DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2016.10.008]
- Murphy C, Carew P J and Stapleton L. 2022. Towards a human-centred framework for smart digital immersion and control for cultural heritage applications. *IFAC-PapersOnLine*, 55(39): 30-35 [DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.12.006]
- Murphy C, Carew P J and Stapleton L. 2023. Innovation process modelling for human-centred cultural heritage spaces: developing a business model canvas for smart digital immersion. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2): 9954-9959 [DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.695]
- Radford A, Metz L and Chintala S. 2016. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks [EB/OL]. [2025-01-21]. <https://arxiv.org/pdf/1511.06434.pdf>
- Rallis I, Kopsiaftis G, Kalisperakis I, Stentoumis C, Koutsomitsos D and Riga V. 2022. A mobile game for enhancing tourism and cultural heritage. *Procedia Computer Science*, 204: 513-518 [DOI: 10.1016/j.procs.2022.08.062]
- Renner R S, Velichkovsky B M and Helmert J R. 2013. The perception of egocentric distances in virtual environments—a review. *ACM Computing Surveys*, 46(2): #23 [DOI: 10.1145/2543581.2543590]
- Tamborri R, Patti E, Aliberti A, Dinler M, Orlando M, De Luca C, Tondelli S, Barrientos F, Martin J, Cunha L F M, Stam A, Nales A, Egusquiza A, Amirzada Z and Pavlova I. 2022. A resources ecosystem for digital and heritage-led holistic knowledge in rural regeneration. *Journal of Cultural Heritage*, 57: 265-275 [DOI: 10.1016/j.culher.2022.09.012]
- Tang Y, Xiao X M and Zhou L H. 2016. On the model building of public digital cultural resources integration in China. *Library Journal*, 35(7): 12-25 (唐义, 肖希明, 周力虹. 2016. 我国公共数字文化资源整合模式构建研究. *图书馆杂志*, 35(7): 12-25) [DOI: 10.13663/j.cnki.lj.2016.07.002]
- Tsakoumaki M C, Lala D M, Tsaroucha A and Psaltia A. 2023. Advanced digitization methods for the protection and dissemination of cultural heritage towards digital transformation: the archaeological museum of Delphi. *Procedia CIRP*, 118: 1056-1060 [DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.181]
- Wang H Z and Cao S S. 2023. Intelligent regeneration of culture: design application of artificial intelligence in cultural heritage protection. *Package and Design*, (1): 118-119 (王怀壮, 曹盛盛. 2023. 文化智生: 人工智能在文化遗产保护中的设计应用. *包装与设计*, (1): 118-119)
- Wang W, Chen Y B and Wu Y H. 2022. 3D digital generation and optimization of intangible cultural heritage based on close-range photogrammetry—take the bamboo carvings in Shishi as an example. *Idea and Design*, (3): 68-75 (王巍, 陈玉彬, 吴雨珩. 2022. 基于近景摄影测量法的非遗三维数字模型生成与优化研究——以石市竹木雕为例. *创意设计源*, (3): 68-75) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5159.2022.03.014]
- Wang W L, Hu J S, Wei H X, Ubul Kurbam, Shao W Y, Bi X J, He J J, Li Z J, Ding K, Jin L W and Gao L C. 2024. Survey on text analysis and recognition for multiethnic scripts. *Journal of Image and Graphics*, 29(6): 1685-1713 (王维兰, 胡金水, 魏宏喜, 库尔班·吾布力, 邵文苑, 毕晓君, 贺建军, 李振江, 丁凯, 金连文, 高良才. 2024. 少数民族文字文本分析与识别的研究进展. *中国图象图形学报*, 29(6): 1685-1713) [DOI: 10.11834/jig.240015]
- Wang X G and Hou X L. 2023. The construction of cultural heritage smart data for the inheritance and activation. *Journal of Information Resources Management*, 13(5): 4-14, 43 (王晓光, 侯西龙. 2023. 面向活化利用的文化遗产智慧数据建设论纲. *信息资源管理学报*, 13(5): 4-14, 43) [DOI: 10.13365/j.jim.2023.05.005]
- Wang X G and Zhang S Q. 2024. Creative transformation and innovative development of traditional art under the background of cultural digitization. *Social Sciences in Nanjing*, (5): 144-154 (王夏歌, 张苏秋. 2024. 文化数字化背景下传统艺术的创造性转化与创新性发展. *南京社会科学*, (5): 144-154) [DOI: 10.15937/j.cnki.issn1001-8263.2024.05.015]
- Xu Y X, Li B, Tan S Q and Huang J W. 2024. Research progress on speech deepfake and its detection techniques. *Journal of Image and Graphics*, 29(8): 2236-2268 (许裕雄, 李斌, 谭舜泉, 黄继武. 2024. 语音深度伪造及其检测技术研究进展. *中国图象图形学报*, 29(8): 2236-2268) [DOI: 10.11834/jig.230476]
- Yang X, Chen T and Xia Y. 2024. Research on the integrated ontology model construction of cultural heritage based on Schema.org. *Library and Information Service*, 68(2): 100-109 (杨鑫, 陈涛, 夏焱. 2024. 基于Schema.org的文化遗产一体化本体模型构建研究. *图书情报工作*, 68(2): 100-109) [DOI: 10.13266/j.issn.0252-3116.2024.02.009]
- Yao G Z and Liu Z Y. 2022. Foreign experiences in applying digital measures to intangible heritage preservation and promotion. *Southeast Culture*, (6): 179-185 (姚国章, 刘增燕. 2022. 国外非物质文化遗产数字化保护与传承实践借鉴. *东南文化*, (6): 179-185) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-179X.2022.06.023]
- Zeng Y L and Lyu X L. 2024. Practical exploration and development focuses of the digitalization of public culture in China. *Documentation, Information and Knowledge*, 41(3): 60-71 (曾粤亮, 吕晓龙. 2024. 我国公共文化数字化的实践探索与发展重点. *图书情报知识*, 41(3): 60-71) [DOI: 10.13366/j.dik.2024.03.060]
- Zhang J, Luo J F, Duan J S, Li J X, Yang C C and Yang N Y. 2024. Technological paths for cultural heritage protection and multidisciplinary participation: insights into related discipline construction in the context of new humanities. *Library Theory and Practice*, (2): 1-13 (张靖, 罗简凡, 段敬松, 李及鑫, 杨程诚, 杨乃一. 2024. 文化遗产的科技保护路径及其中的多学科参与——兼论

- 对新文科背景下相关学科建设的启示. 图书馆理论与实践, (2): 1-13 [DOI: 10.14064/j.cnki.issn1005-8214.2024.02.009]
- Zhang J M and Gao L J. 2022. Application of super-resolution reconstruction technology based on AI deep learning in image file restoration. Archives of China, 2022, (11): 36-37 (张建明, 高黎娟. 2022. 基于AI深度学习的超分辨率重建技术在图像档案修复中的应用研究. 中国档案, (11): 36-37)
- Zhang J R, Wan Yahaya W A J and Sanmugam M. 2024. The impact of immersive technologies on cultural heritage: a bibliometric study of VR, AR, and MR applications. Sustainability, 16 (15): #6446 [DOI: 10.3390/su16156446]
- Zhang J W and Zuo L L. 2020. VR-heritage: Chinese cultural heritage in the digital age [EB/OL]. [2025-04-01]. <https://doi.org/10.3998/ars.13441566.0050.004>
- Zhang M, Che Y F and Zhang Y. 2019. Systematic review of users' online privacy protection behaviors. Library Tribune, 39 (8): 96-107 (张敏, 车雨霏, 张艳. 2019. 用户在线隐私保护行为研究述评. 图书馆论坛, 39 (8): 96-107) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1167.2019.08.012]
- Zhang Q and Jiang G A. 2024. NFT digital publishing development concerns and governance strategies. China Publishing, 2024, (16): 57-61 (张琪, 江高岸. 2024. NFT数字出版发展隐忧与治理策略. 中国出版, (16): 57-61)
- Zhang Z A and Lyu W S. 2024. Enhancing virtual reality: new quality productive forces for Chinese excellent traditional culture in the AIGC era. Youth Exploration, (5): 25-36 (张志安, 吕伟松. 2024. 增强“虚拟现实”: AIGC时代中华优秀传统文化的新质生产力. 青年探索, (5): 25-36) [DOI: 10.13583/j.cnki.issn1004-3780.2024.05.003]
- Zhao X Q, Yao Y H, Li T E and Dong M W. 2023. Research on the integration of knowledge element attributes of intangible cultural heritage digital resources based on evidence theory. Scientific Information Research, 5(3): 26-35 (赵雪芹, 姚宇航, 李天娥, 董美雯. 2023. 基于证据理论的非遗数字资源知识元属性融合研究. 科技情报研究, 5(3): 26-35) [DOI: 10.19809/j.cnki.kjqbyj.2023.03.003]
- Zhao Y X and Lian J W. 2021. Review of cultural heritage crowdsourcing in the domain of digital humanities. Data Analysis and Knowledge Discovery, 5(1): 36-55 (赵宇翔, 练靖雯. 2021. 数字人文视域下文化遗产众包研究综述. 数据分析与知识发现, 5(1): 36-55) [DOI: 10.11925/infotech.2096-3467.2020.0906]
- Zheng Q F. 2023. Architectural Design of digital exhibition space in intelligent museum. Building Science, 2023, 39(7): #179 (郑琦凡. 2023. 智能博物馆数字化展示空间建筑设计. 建筑科学, 39(7): #179)
- Zhou X, Tian J P, Peng J and Su M Z. 2021. A smart tourism recommendation algorithm based on cellular geospatial clustering and multivariate weighted collaborative filtering. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(9): #628 [DOI: 10.3390/ijgi10090628]

作者简介

- 栗青生,男,教授,主要研究方向为自然语言处理、中文计算和媒体安全技术。E-mail: aylqs@163.com
- 罗欣,通信作者,女,硕士研究生,主要研究方向为智能传播。E-mail: luoxin020228@163.com
- 倪婷,女,硕士研究生,主要研究方向为数字媒体与智能传播。E-mail: 1545386268@qq.com
- 郑嘉雯,女,硕士研究生,主要研究方向为数字媒体与智能传播。E-mail: 2459871356@qq.com
- 杨帆,女,硕士研究生,主要研究方向为数字媒体与智能传播。E-mail: 763928720@qq.com
- 张莉,女,副教授,主要研究方向为创业创新、信息安全服务。E-mail: 517534312@qq.com
- 潘志庚,男,教授,主要研究方向为虚拟现实和人机交互。E-mail: 003443@nuist.edu.cn
- 王美丽,女,教授,主要研究方向为计算机图形图像、三维建模、仿真与可视化。E-mail: wml@nwsuaf.edu.cn