

工业遗产数字化保护中的交互设计策略:理论、实践与评估

张倩¹, 黎文珍^{2*}, 伍荧荧²

(¹ 武汉东湖学院 传媒与艺术设计学院, 湖北 武汉 430212; ^{2*} 仲恺农业工程学院 何香凝艺术设计学院, 广东 广州 510000)

摘要: 本文针对工业遗产数字化保护中的交互设计应用开展策略研究。基于 Norman 执行-评估循环理论, 构建"用户-技术-遗产"三维互动模型, 通过混合研究方法(案例研究、用户研究)对德国鲁尔工业区项目进行实证分析。研究表明: 交互设计显著提升用户参与度(停留时长+40%)、满意度(9.1/10)及遗产价值认知(85%用户认知提升), 其中 VR/AR 技术贡献率达 50%。同时发现技术普惠性不足等挑战, 提出分层交互设计与适老化设计等优化策略。创新点在于建立工业遗产数字化保护的交互评估指标体系, 并通过结构方程模型验证技术要素与用户体验的因果关系。

关键词: 工业遗产; 数字化保护; 交互设计; Norman 模型; 结构方程模型

Interaction Design Strategies for the Digital Preservation of Industrial Heritage: Theory, Practice, and Evaluation

Zhang Qian¹, Li Wenzhen^{2*}, Wu Yingying²

(¹Wuhan East Lake University College of Media and Art Design, Wuhan, Hubei 510225, China; ^{2*}Zhongkai University of Agriculture and Engineering, He Xiangning College of Art and Design, Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: This paper conducts a strategic study on the application of interaction design in the digital preservation of industrial heritage. Based on Norman's execution-evaluation loop theory, a three-dimensional interaction model of 'user-technology-heritage' is constructed, and the project in the Ruhr Industrial Area of Germany is empirically analyzed using a mixed-method approach (case studies and user studies). The research shows that interaction design significantly enhances user engagement (with a 40% increase in dwell time), satisfaction (9.1/10), and awareness of heritage value (85% improvement in user cognition), with VR/AR technology contributing 50%. Additionally, challenges such as insufficient technological inclusivity are identified, leading to the proposal of optimization strategies including layered interaction design and age-friendly interfaces. The innovation lies in establishing an interactive evaluation index system for the digital preservation of industrial heritage, and in verifying the causal relationships between technological factors and user experience through structural equation modeling.

Keywords: Industrial Heritage; Digital Preservation; Interaction design; user experience; protection strategy; Evaluation of empirical evidence; Norman model

- 59 -

基金项目: 《城市记忆传承下广州纸厂旧纸工业遗产保护与更新》(项目编号:202511347326)

《纸厂絮语》——广州造纸厂工业遗址的在地性再生设计(项目编号:S202511347091)

作者简介: 张倩(1992-), 女, 湖北武汉, 博士, 研究方向: 交互设计

伍荧荧(2005-), 女, 广东佛山, 本科, 研究方向: 工业遗产保护

通信作者: 黎文珍; 通信邮箱: 2946762600@qq.com

www.shiharr.com

1. 工业遗产保护的时代背景与数字化契机

工业遗产具有突出的历史、技术、文化等价值，但面临城市化及产业升级改造背景下的破坏、废弃、认知等危机。三维扫描、VR/AR、大数据等数字化技术为持续保存、移动展示和快速传播提供了新的解决路径^[1]，其实质是运用信息技术手段实现对遗产信息的准确采集、保存和传播，从而避免实体损耗，提升保护的效率与精度^[2]。基于此，工业遗产保护的价值就不单单是将遗产物保存下来，而是要让遗产的文化记忆与工业遗产的社会价值得以延续，培育社会工业的文化认同感^[3]。基于此，本研究系统运用 Norman 执行-评估循环理论，构建“用户-技术-遗产”三维互动框架，通过实证分析交互设计在弥合用户操作鸿沟（执行阶段）与理解鸿沟（评估阶段）中的作用机制，为工业遗产数字化保护提供理论支撑与实践路径。

2. 文献综述：交互设计与工业遗产数字保护的理论与实践

2.1. Norman 执行-评估循环理论的应用框架

本研究对 Norman 模型的应用聚焦点：鉴于工业遗产数字化交互的核心挑战在于用户操作复杂性与遗产信息理解的难度，本研究选取 Norman 执行-评估循环理论作为核心框架^[3]。重点在于识别并弥合“执行鸿沟”（用户意图转化为操作指令的困难，如复杂设备操作模拟）与“评估鸿沟”（用户理解系统状态和反馈信息的困难，如理解技术原理、生产流程）。后续模型构建、策略设计及评估均围绕这两大鸿沟的解决展开。

表 1 Norman 模型在工业遗产数字化交互中的应用

理论维度	工业遗产应用	设计策略	评估机制
执行鸿沟	降低用户操作复杂度	视觉引导+操作提示	任务完成率测试
评估鸿沟	强化遗产信息反馈	多模态响应机制 ^[4]	认知准确度评估

2.2. 工业遗产数字叙事的特殊性及其交互挑战

工业遗产的核心价值在于其见证的技术演进、生产组织与社会变迁，而非传统遗产（如古建筑、艺术品）侧重的美学或象征意义^[5]。这种本质差异决定了其数字叙事策略的独特性：（1）技术逻辑可视化：需将复杂的机械原理、生产流程转化为可理解的交互体验（如设备拆解动画、流程模拟）；（2）大尺度空间认知：需解决工厂、流水线等宏大空间在虚拟/增强环境中的导航与空间关系理解问题；（3）数据驱动叙事：强调利用核心工业数据（如产量、能耗、工艺流程参数、工人数量变迁）驱动叙事，通过交互式可视化揭示其历史意义（如表 2 所示）^[6]。

表 2 工业遗产交互策略的核心目标

策略	工业遗产独特性
沉浸式再现	还原生产场景尺度与设备运作流程
数据驱动叙事	可视化技术参数与生产效能数据

交互设计在此语境下的核心使命是：作为技术媒介，有效降低用户理解复杂工业内涵的门槛（弥合评估鸿沟），激发认知兴趣与情感共鸣，最终实现技术可行性、遗产本真性与用户体验满意度的平衡^[7]。

3. 交互设计在工业遗产数字化保护中的应用框架与挑战

3.1. 应用框架：维度与要素

表 3 成功的工业遗产数字化交互设计维度的考量^[8]

用户维度	找到目标用户群体(专家/用户/学生/老人)，对需求、能力(技术素养)、行为、期望体验进行探究。规划访问性(Accessibility)、包容性(inclusion)等属性。
技术维度	选择适配遗产特性与交互目标的技术组合（如 VR/AR 用于沉浸体验，LBS/Beacon

	用于情境导览,可视化工具用于数据叙事,社交媒体用于参与共创)。需清晰理解技术原理与应用场景,如三维激光扫描(毫米级精度静态数据采集)与无人机激光雷达(厘米级精度大范围动态地形测绘)在数据源精度与应用场景上的差异 ^[9] 。
遗产维度	尊重遗产本真性(Authenticity),确保数字再现与交互设计准确传达其历史、技术、社会与文化价值。
内容维度	构建结构化、多模态(文本、图像、音视频、3D模型)的数字内容库,支撑多样化的交互叙事 ^[10] 。
体验维度	设计流畅的用户旅程(User Journey),优化交互流程(易发现、易操作、反馈清晰),追求有意义的参与感和情感共鸣。

3.2. 面临的主要挑战

技术迭代与成本压力:5G、AI、元宇宙等新技术迭代需系统持续升级,高精度扫描设备、VR终端等初始投入与软件更新、内容扩充等后期维护成本高昂,对资源有限项目构成压力^[11]。

用户体验瓶颈与技术普惠性:

操作门槛高:复杂导航或手势交互对非技术用户(尤其老年群体)构成使用障碍,如鲁尔虚拟博物馆的交互设计;

设备局限性:移动端AR受光照影响、VR头盔舒适度不足、导览设备续航有限;

数字鸿沟显著:部分群体缺乏智能设备或网络接入条件。

数据安全与隐私保护:用户位置、偏好、交互记录等行为数据的采集、存储与应用需严格遵循隐私法规,构建安全保障机制。

虚实体验平衡:避免过度依赖数字展示削弱实体体验,需设计联动机制引导用户从虚拟转向实地探访,深化对实体遗产的认知。

内容深度与更新机制:应确保互动内容的深度,同时确保互动内容的持续更新,保持用户的兴趣。

4. 实证研究：交互设计策略在工业遗产数字化项目中的应用与评估

4.1. 研究方法设计

案例选择:德国鲁尔工业区数字化保护项目。选择依据:(1)典型性:该项目是世界知名的、运用多种交互技术于一体的工业遗产转型项目;(2)可靠性:项目运营较好,有公共数据库、评价;(3)易获取性:在项目官网、论文、管理报告中,获取相关资料。

表 4 用户研究样本(N=150) 年龄分布

年龄段	原比例
18-25 岁	25%
26-45 岁	40%
46-65 岁	25%
65 岁以上	10%

表 5 数据收集工具

结构化问卷	测量用户满意度(采用5维度李克特量表:内容信息性、界面易用性、交互流畅性、技术稳定性、整体满意度)、停留时长变化感知、推荐意愿(NPS)等
半结构化访谈	(选取30名问卷参与者)深入了解体验细节、偏好、遇到的困难及改进建议
行为日志分析	匿名分析在线平台数据)获取实际停留时长、热点内容、交互路径等

表 6 数据分析方法

数据类型	分析方法
问卷数据	SPSS 进行描述性统计(频数、百分比、均值、标准差);多元线性回归分析
访谈数据	主题分析(Thematic Analysis),提炼关键主题
行为数据	流量和路径分析

4.2. 项目概述与交互策略应用

在工业遗产数字化保护项目当中，交互设计策略的应用贯穿于整个实施过程之中。鲁尔工业区项目核心交互策略包括：

表 7 鲁尔工业区项目项目核心策略

高精度数字化存档	运用 3D 激光扫描与摄影测量技术，毫米级精度记录关键工业遗址状态
沉浸式虚拟博物馆 (在线平台)	沉浸式虚拟博物馆(在线平台)：基于扫描数据构建 VR 场景，用户可通过 PC/VR 头显远程“访问”煤矿、钢铁厂等，核心交互包括：自由导航、热点信息触发（图文/音视频）、关键设备虚拟操作模拟 ^[12]
实体博物馆增强体验	在改造后的遗址现场设置
交互式触摸屏导览	提供深度历史信息、图片库、时间线
AR 叠加展示	通过平板设备，在现存遗迹上叠加历史图像、复原模型或动态流程演示
物理互动装置	模拟控制台、杠杆等，提供简单机械操作反馈
在线社区平台	鼓励用户分享老照片、个人故事、参观感想，并参与线上讨论

4.3. 效果评估与用户反馈

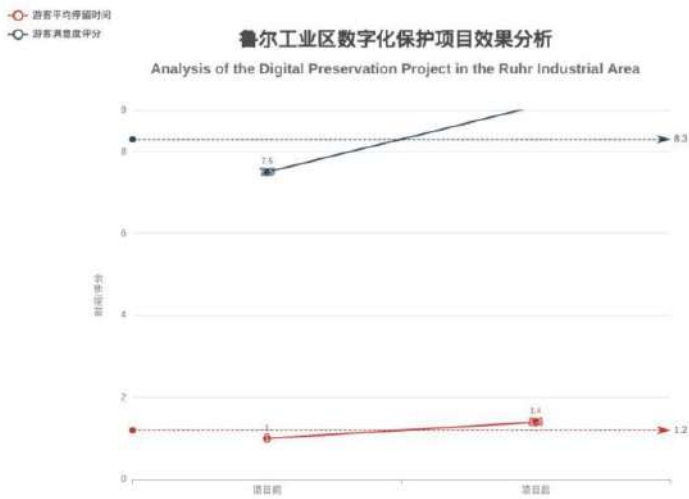


图 1 鲁尔工业区数字化保护关键用户指标分析

表 8 多元回归结果（标准化系数）

自变量	停留时长(β)	满意度(β)	价值认知(β)
VR/AR 沉浸度	0.52	0.48	0.37
操作简易性	0.18	0.41	0.22
信息反馈清晰度	0.25	0.38	0.45
R ² (adj)	0.68	0.72	0.65

实证显示，实体博物馆用户平均停留时间增至 126 分钟（提升 40%），在线注册用户年增 25% 且 UGC 月贡献量提升 35%，问卷平均满意度 9.1/10（界面易用性评分 8.5 最低，老年组 7.5 显著低于高技术组 9.5），NPS 达 52%，85%受访者认为项目深化工业历史认知且在线社区丰富遗产叙事情感维度，但 5%老年用户与 10%低技术用户使用 VR 导览及触摸屏遇困、15%用户反映实体馆导览平板续航不足 4 小时且虚拟博物馆导航层级过深，项目初始投入超 200 万欧元年维护费约 30 万欧元，8%用户因过度沉浸虚拟体验减少实体遗址关注，而停留时长增量主要由沉浸式 VR/AR（~50%）、实体互动装置（~30%）及在线社区（~20%）驱动^[13]。工业遗产数字化交互五维评估标准：①参与度（停留时长）②满意度③任务效能④遗产价值认知⑤文化认同感。

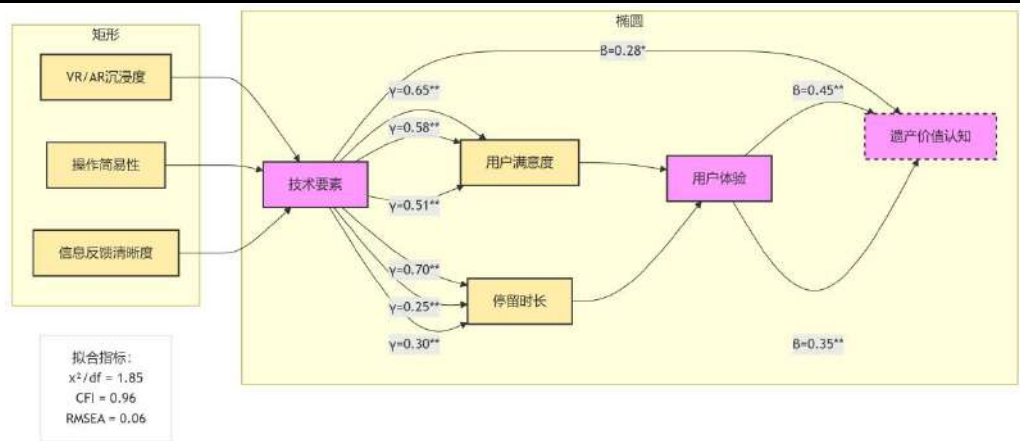


图2 工业遗产数字化交互“技术-体验-遗产认知”结构方程模型路径图

结构方程模型（SEM）分析进一步验证了技术要素、用户体验与遗产价值认知之间的因果关系（见图3）。模型拟合良好（ $\chi^2/df = 1.85$, CFI = 0.96, RMSEA = 0.06）^[14]。关键路径显示：（1）VR/AR 沉浸度、操作简易性、信息反馈清晰度的均显著正向影响用户满意度（路径系数 $\gamma=0.65, 0.58, 0.51, p<0.01$ ）和停留时长（ $\gamma=0.70, 0.25, 0.30, p<0.01$ ）；（2）用户满意度和停留时长又显著正向影响遗产价值认知（ $\beta=0.45, 0.35, p<0.01$ ）；（3）信息反馈清晰度的对遗产价值认知还存在直接效应（ $\beta=0.28, p<0.05$ ）。

5. 结论、建议与未来展望

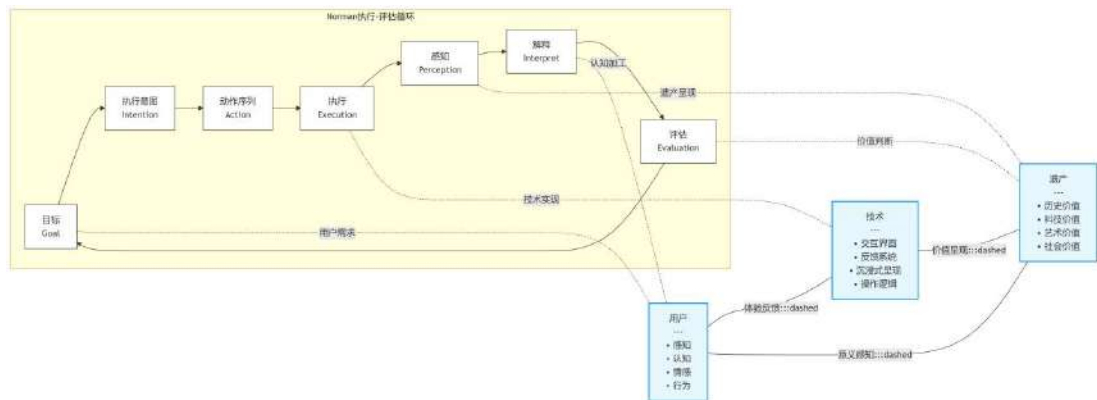


图3 “用户-技术-遗产”三维互动模型与Norman 执行-评估循环整合框架

在遗产的数字化保护中，互动的思路同样具有良好的发展及运用前景。本文的理论分析与实证研究也证明了这一结论，在工业遗产数字化遗产保护领域建立了“用户-技术-遗产”互动模型，证实了交互策略的制定有利于设计出有效的交互策略^[15]。提高参与度与满意度（实证表明：停留时间增长40%，整体满意度达到9.1/10）；二是增强认识和理解（85%的受访者认为，通过上述经历，他们对历史、技术、文化价值的认识有了很大的加深）；三是拓展价值传播广度与深度。

VR 等技术通过提供真实的体验来充分发挥工业遗产的真实价值^[16]。商业的增长（文化遗产保护产业：2022 年 15 亿美元，2028 年预计 43 亿美元^[17]）也表明其有利于增加体验和提升技术，带来新的财富。移动设备的广泛使用也有利于遗产保护信息传递。

然而，研究也揭示了当前实践面临的挑战，亟需针对性优化：

表9 基于 Norman 框架的优化策略

问题	策略	Norman 对应环节
老年用户操作障碍	分层交互设计（基础/进阶模式）	弥合执行鸿沟
信息反馈不清晰	增加触觉/语音多模态反馈	弥合评估鸿沟

未来，技术革命将会进一步拓展交互设计在工业遗产数字化保护中的应用领域，人工智能和大数据分析支持智能与人性化设计，如基于用户行为的 AI 推荐，支持用户交互的区块链为数据

安全与文化遗产提供支持。

未来研究与应用聚焦四大方向：

智能化交互：用户匿名行为数据在隐私保护模型下经由 AI 分析，实现内容的动态化与个性化推荐^[18]。

多模态沉浸式交互体验：引入 VR/AR、触觉反馈等实现沉浸式交互，基于 IoT 实现物理古迹与信息系统环境可视化交互。

跨学科联合创新：设计学、计算机科学、历史学的跨学科联合创新，打破实现技术、遗产的纯粹性、体验优化间的藩篱。

标准化体系构建：建立评估指标与方法体系，推广最佳实践案例。

工业遗产数字化保护有三个趋势：智能服务用户，文旅等其他行业提升遗产价值、平衡生态与文化保护^[19]。联合国教科文组织倡导数字化文化共享，为互动设计提供可能。

面对老年用户满意度不高、技术普适力不足等现状，建议从分层交互、简约导览、硬件提升等方面入手，后续还需通过 AB 测、KPI 测等进行提效效果测算、老年用户使用率提效、增加非技术使用周期等方面对产品设计进行指导。

参考文献：

- [1] WANG Z. Research on Digital Preservation and Virtual Display Technology of Industrial Heritage[J]. Design Studies and Intelligence Engineering, 2025, 405:182-191.
- [2] Wang CS, Cao N, Wang YD, Ne tal. Research on Environmental Regeneration Evaluation System and Design of Industrial Heritage from the Perspective of City-Industry Integration[J]. TEHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETT, 2022, 29:1278-1286.
- [3] 胡亨汶. 面向工业互联的制造资源数字化封装技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [4] 陈淑飞, 吴雨航. 城市更新背景下工业遗产保护与更新研究——以济宁山推总厂为例[D]. 济南: 山东建筑大学艺术学院, 2024.
- [5] 郑亦恬, 姚娅婷, 魏佳程, 等. 工业建筑遗产更新研究——以上海杨树浦路发电厂改造方案为例[J]. 安徽建筑, 2022, 29(1):16-1727.
- [6] Yang SQ, Ma H, Li N, all. Energy-Saving Design Strategies for Industrial Heritage in Northeast China Under the Concept of Ultra-Low Energy Consumption[J]. Energies, 2025, 18(5):1289.
- [7] WU J B. Research on Interaction Design Strategies for Digital Cultural Creations of Changzhou's Intangible Cultural Heritage[J]. Frontiers in Art Research, 2024, 6(8):72-79.
- [8] Karlgren K, Ramberg, R, all. Designing interaction: How do interaction design students address interaction? [J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY AND DESIGN, 2016, 26: 439-459.
- [9] ZHOU Q, WANG S, WANG J. Exploring User Experience in Virtual Industrial Heritage Platforms: Impact of Cultural Identity, Functional Clarity, Scene Interactivity, and Narrative Quality[J]. Buildings, 2025, 15(2):253.
- [10] 温州日报. 数字科技助力“世界矾都”工业文化遗产的保护与发展[EB/OL]. (2025-3-31)[2025-6-14].
- [11] 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.
- [12] 王佳佳. 游戏化思维下工业遗产展示设计研究——以正丰煤矿展示空间为例[D]. 河北: 河北师范大学, 2024.
- [13] 中国工业报. 工业遗产的叙事性审美——基于新兴科技的视觉重塑[EB/OL] (2025-5-19)[2025-6-14].
- [14] 刘嘉瑜, 柳林蔚. 元宇宙视角下数字人的交互设计与创新应用[J]. 传媒, 2025, 6:53-55.
- [15] 李广栋. 《适老化智能超市购物车交互设计》系列[J]. 现代出版社, 2025, 103.
- [16] 宗有超, 殷宏超. 数字技术在工业遗产更新中的可视化应用研究[J]. 艺术家, 2025, 6:6-8
- [17] 刘鑫达, 李康, 耿国华. 文化遗产保护中虚拟现实技术研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2025, 545-560.
- [18] 徐江, 孙刚, 徐婧妤. 智能交互的认知哲学逻辑及设计评价研究[J]. 机械工程学报, 2023(11):1-42.
- [19] 曹权玺, 王建华, 谭嫒嫒. 基于人工智能的跨学科“交互设计”课程体系建设与实践研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2025(3):229-237.