

数字文旅专业系列教材 · 教学课件

文化遗产保护概论——非遗数字化与文物数字典藏

第6章 VR/AR/MR 与沉浸式体验技术

授课对象：安顺学院旅游管理学院 · 旅游管理专业本科生

主讲：祝刚

本章导览

- 6.1 虚拟现实 (VR) 技术
- 6.2 增强现实 (AR) 技术
- 6.3 混合现实 (MR) 与扩展现实 (XR)
- 6.4 沉浸式体验设计
- 6.5 技术评估与发展趋势
- 知识卡片
- 6.6 VR/AR/MR 在文化遗产中的应用案例深度分析
- 6.7 沉浸式体验的技术经济分析
- 6.8 元宇宙与文化遗产的未来
- 6.9 沉浸式体验设计的理论深化
- 6.10 VR/AR/MR 技术评估方法论
- 6.11 VR/AR/MR 在文化遗产教育中的应用
- 6.6 扩展现实 (XR) 技术的前沿发展与文化遗产应用
- 6.7 沉浸式体验设计的理论深化

- 1. 识记：VR、AR、MR 三种技术的概念差异与各自技术原理
- 2. 理解：沉浸感理论的核心维度及其在文化遗产体验设计中的应用
- 3. 应用：运用交互设计原则设计一个文化遗产 VR 体验项目
- 4. 分析：分析 VR/AR/MR 在文化遗产保护中的不同应用模式与适用场景
- 5. 评价：评估元宇宙概念对文化遗产数字化保护的潜在影响
- 6. 创造：设计一个融合 VR 和 AR 的博物馆沉浸式展览方案

- 2019 年，E-MAX" 重返 · 西洋楼 " 沉浸交互秀在北京首演。该项目以圆明园西洋楼遗址为题材，通过沉浸式数字技术再现了西洋楼从建造、辉煌到损毁的历史过程。
- 贺艳等人在分析该项目时指出，文化遗产的数字化阐释需要突破传统的 " 信息展示 " 模式，构建 " 空间叙事 + 身体参与 + 情感共鸣 " 的新型传播模式。

01

6.1 虚拟现实 (VR) 技术

6.1.1 VR 技术原理与系统构成

- 虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 是通过计算机生成的三维环境，使用户通过头戴式显示器 (HMD) 等设备获得身临其境的沉浸感。
- VR 系统由三个核心组件构成：显示系统 (提供立体视觉)、追踪系统 (检测用户头部和身体运动)、交互系统 (接受用户输入并反馈)。
- Bekele 等人在对增强现实、虚拟现实和混合现实在文化遗产中应用的综述中指出，VR 技术已在文化遗产保护领域应用约二十年，使任何拥有网络连接或 VR 头显的人都能 " 访问 " 文化遗产地。

6.1.2 VR 在文化遗产中的应用模式

- VR 在文化遗产中的应用主要有四种模式：虚拟重建——对已消失或损毁的文化遗产进行数字重建；虚拟漫游——为不可移动文物（如石窟寺、古建筑）提供虚拟参观；情境再现——重现历史事件或生活场景；
- 教学体验——为文化教育提供沉浸式学习环境。
- 王蕊嘉和蒋永华在研究基于文化遗产的虚拟现实艺术设计策略时，分析了敦煌 VR 古籍寻游记、故宫 VR 倦勤斋、秦·兵马俑 VR 影片等优秀案例，从视听、交互和沉浸式体验三个角度提出了 VR 艺术设计策略。

6.1.3 全景 VR 与虚拟漫游

- 全景 VR 技术通过 360 度全景照片或视频构建虚拟环境，用户可以通过 PC、手机或 VR 设备进行虚拟漫游。
- 孔莉莉以全景 VR 视频技术为例，探讨了数字化艺术文化遗产保护的教学实践，该技术可实现 360 度全视角的动态视听媒体信息记录和还原。

02

6.2 增强现实 (AR) 技术

6.2.1 AR 技术原理与特征

- 增强现实 (Augmented Reality, AR) 是在现实世界上叠加数字信息的技术。与 VR 创建完全虚拟环境不同, AR 保留了用户对真实环境的感知, 在其上 " 增强 " 虚拟内容。
- Boboc 等人在综述 AR 在文化遗产中的应用时指出, 过去十年 AR 技术在文化遗产领域的应用呈指数级增长, 从简单的信息叠加发展为复杂的多模态交互体验。

6.2.2 AR 在文化遗产展示中的应用

- AR 在文化遗产展示中的应用包括：信息增强——在实物展品上叠加文字、图像、动画等说明信息；虚拟复原——在遗址现场叠加历史原貌的虚拟重建；互动体验——通过 AR 游戏化设计增强观众参与度。
- 师国伟等人在分析增强现实技术在文化遗产数字化保护中的应用时指出，AR 技术能够充分体现 " 背景环境中的古迹遗址 " 这一文化遗产保护新主题，在遗产数字化保护上具有独特优越性。

6.2.3 移动 AR 与文化遗产导览

- 移动 AR 利用智能手机和平板电脑的摄像头和传感器，在真实环境中叠加虚拟内容，为文化遗产地提供智能导览服务。
- Sprung 和 Haxha 开发的 iFAR 系统展示了移动 AR 在文化遗产户外展示中的应用潜力。

03

6.3 混合现实 (MR) 与扩展现实 (XR)

6.3.1 MR 技术原理

- 混合现实 (Mixed Reality, MR) 是 VR 和 AR 的融合体，虚拟内容与现实环境实时交互。MR 技术需要更先进的空间映射和深度感知能力，使虚拟对象能够 "理解" 现实空间的几何结构。

6.3.2 MR 在博物馆中的应用

- Trunfio 等人在研究博物馆混合现实体验时发现，MR 设备的功能元素对访客的沉浸式体验和体验后行为有显著影响，MR 技术能够促进文化遗产的沉浸式学习。
- Barrile 等人在考古博物馆的 3D 测绘和混合现实综合研究中，展示了 MR 技术在考古遗产展示中的创新应用。

6.3.3 XR 技术融合趋势

- 扩展现实 (Extended Reality, XR) 是 VR、AR、MR 的统称，代表了沉浸式技术的融合发展方向。
- Rambach 等人在综述 XR 在自然和环境领域的应用时指出，XR 技术正在从单一技术独立应用向多技术融合集成发展。

04

6.4 沉浸式体验设计

6.4.1 沉浸感理论

- 沉浸感 (Immersion) 是 VR/AR/MR 体验的核心评价指标。
- 根据沉浸感理论，沉浸感包含三个层次：感知沉浸 (sensory immersion，由技术设备性能决定)、叙事沉浸 (narrative immersion，由故事内容决定) 和挑战沉浸 (challenge immersion，由交互任务决定)。
- Ababneh 在研究数字技术对文化遗产保护的影响时指出，VR 和 AR 技术革命性地改变了人们参与和体验文化遗产的方式，VR 允许用户沉浸在完全虚拟的历史环境中，AR 则在现实环境中叠加数字信息。

6.4.2 交互设计原则

- 文化遗产沉浸式体验的交互设计应遵循以下原则：自然性——交互方式应贴近日常行为习惯；反馈性——用户的每个操作都应有明确的反馈；引导性——引导用户自主探索而非强制线性体验；
- 可及性——考虑不同年龄和能力群体的需求。

6.4.3 多感官体验设计

- 高级沉浸式体验不仅依赖视觉和听觉，还整合触觉（力反馈手套）、嗅觉（气味释放装置）等感官通道。
- 李建和张杰在分析 VR/AR 技术在历史文化街区中的应用时，介绍了古建筑数字化复原、历史文化街区虚拟全景漫游以及历史名人全息投影式再现互动等多个应用模式。

05

6.5 技术评估与发展趋势

6.5.1 用户体验评估方法

- VR/AR/MR 体验的评估方法包括：主观评价 (问卷、访谈)、客观测量 (眼动追踪、脑电波、心率等生理数据) 和行为分析 (用户行为日志、停留时间等)。

6.5.2 技术成熟度分析

- | 技术 | 成熟度 | 主要瓶颈 | 预计突破时间 ||-----|-----|-----|-----|| VR | 成熟期 | 设备成本、
- 眩晕问题 | 已突破 || AR | 成长期 | 户外稳定性、识别精度 | 3-5 年 || MR | 早期 | 空间映射精度、
- 设备便携性 | 5-10 年 || XR 融合 | 概念期 | 跨平台标准、内容生态 | 10 年 + |

6.5.3 元宇宙与文化遗产

- 元宇宙概念为文化遗产数字化保护提供了新的想象空间。将文化遗产融入元宇宙平台，可能实现跨越物理边界的协同体验和创造。
- Baviera López 等人指出，遗产虚拟化已成为现实，虚拟和增强现实正在赋予访客前所未有的博物馆体验。Lyu 在研究博物馆数字化转型时指出，数字化转型为文化遗产的保护与传承提供了新路径。

06

知识卡片

- 知识卡片 6-1： VR/AR/MR 技术对比 | 特征 | VR | AR | MR ||-----|-----|-----|-----|| 环境 | 完全虚拟 | 现实 + 虚拟叠加 | 现
- 实 + 虚拟交互 || 沉浸感 | 最高 | 中等 | 高 || 典型设备 | VR 头显 | 手机 /AR 眼镜 | HoloLens || 文化遗产应用 | 虚拟重建 / 漫游 | 信息增强 / 导
- 览 | 混合展示 / 互动 | 知识卡片 6-2： 沉浸感三层次 1. 感知沉浸：由显示分辨率、帧率、
- 视场角等设备性能决定 2. 叙事沉浸：由故事内容的吸引力和情感共鸣决定 3. 挑战沉浸：由交互任务的难度和反馈机制决定

07

6.6 VR/AR/MR 在文化遗产中的应用案例深度分析

6.6.1 案例一：敦煌 VR 古籍寻游记

- "敦煌 VR 古籍寻游记" 是敦煌研究院与科技企业合作开发的 VR 体验项目。该项目利用 VR 技术重现敦煌莫高窟藏经洞的历史场景，用户可以 "走进" 藏经洞，翻阅数字化的古代文献，体验千年文化的历史厚度。
- 王蕊嘉和蒋永华在分析该项目时指出，其在视觉表现、交互设计和沉浸感营造方面达到了较高水准，为文化遗产 VR 体验设计提供了可借鉴的范式。
- 该项目的成功要素包括：一是学术准确性——VR 场景中的建筑、服饰、器物等都基于严谨的学术研究进行复原；二是叙事吸引力——通过故事化的叙事设计引导用户探索，而非简单的信息展示；
- 三是技术稳定性——VR 系统运行流畅，眩晕感控制良好。

6.6.2 案例二：故宫 VR 倦勤斋

- 故宫倦勤斋是乾隆皇帝的私人空间，因保护需要限制了实地参观。故宫博物院开发了倦勤斋 VR 体验项目，通过高精度三维扫描和 VR 技术，使公众可以 " 走进 " 这一未开放区域进行虚拟参观。
- 该项目的特色在于极致的视觉精度——墙壁上的通景画、天花板上的紫藤花架等细节都得到了高保真还原，用户可以近距离观察在实地参观中难以看到的细节。

6.6.3 案例三：圆明园 " 重返 · 西洋楼 " 沉浸交互秀

- E-MAX" 重返 · 西洋楼 " 沉浸交互秀代表了文化遗产沉浸式体验的前沿实践。
- 贺艳等人在分析该项目时指出，其创新在于突破了传统的 " 信息展示 " 模式，构建了 " 空间叙事 + 身体参与 + 情感共鸣 " 的新型传播模式。
- 该项目融合了大型投影、体感交互、空间音频和灯光效果等多种技术手段，使观众在 360 度沉浸式空间中 " 穿越 " 回圆明园的辉煌时代。

6.6.4 案例四：秦 · 兵马俑 VR 影片

- 秦始皇帝陵博物院的兵马俑 VR 影片利用高精度三维扫描和 VR 技术，使全球观众可以 " 亲临 " 兵马俑坑进行虚拟参观。该项目的特色在于：一是支持多语言解说，服务国际观众；
- 二是提供了多视角切换功能，用户可以从俯视、平视、特写等不同角度观看兵马俑；三是集成了学术解读功能，VR 体验中嵌入了考古专家的讲解。

08

6.7 沉浸式体验的技术经济分析

6.7.1 开发成本构成

- VR/AR/MR 文化遗产项目的开发成本主要包括：内容制作成本 (三维建模、动画制作、音视频录制等，占 40-50%) ；
- 技术开发成本 (VR/AR 引擎开发、交互程序编写、平台部署等，占 30-40%) ；硬件设备成本 (VR 头显、 AR 眼镜、追踪设备等，占 10-15%) ；
- 运营维护成本 (内容更新、设备维护、技术支持等，占 5-10%) 。

6.7.2 用户体验与成本平衡

- 文化遗产沉浸式体验项目需要在用户体验和开发成本之间取得平衡。高保真 VR 体验 (如敦煌 VR 古籍寻游记) 可以提供极致的沉浸感, 但开发成本高昂 (通常数百万元) ;
- 基于全景照片的虚拟漫游成本低廉但交互性有限; 移动 AR 体验具有成本和可及性优势但沉浸感较弱。项目设计者需要根据目标用户、预算限制和使用场景选择合适的技术方案。

09

6.8 元宇宙与文化遗产的未来

6.8.1 文化遗产元宇宙的概念构想

- 文化遗产元宇宙是指在元宇宙平台中构建的文化遗产数字空间，用户可以以虚拟化身形式在其中探索、学习和社交。
- 与传统数字博物馆不同，元宇宙中的文化遗产体验具有社交性（多用户同时在线互动）、创造性（用户可以参与内容创作）和经济性（支持数字资产交易）三大特征。

6.8.2 技术路径与挑战

- 文化遗产元宇宙的技术路径包括：数字孪生建模（高精度文化遗产数字孪生）、区块链确权（数字资产权属管理）、
- AI 内容生成（自动生成展览内容和导览解说）和跨平台互操作（不同元宇宙平台之间的资产互通）。
- 主要挑战包括：技术标准不统一、内容生产成本高、文化本真性难以保证、商业模式尚未成熟。

6.8.3 伦理反思

- 文化遗产元宇宙引发了新的伦理问题。Rouhani 提出的 "Ethically Digital" 概念强调，争议性文化遗产在数字语境中需要特别的伦理考量。
- 在元宇宙中，文化遗产的去语境化风险更加突出——一件脱离了文化语境的文物在元宇宙中可能被任意解读和利用。因此，文化遗产元宇宙的建设需要建立伦理治理框架，确保文化主权和社区权益得到尊重。

10

6.9 沉浸式体验设计的理论深化

6.9.1 沉浸感理论的三个层次

- 沉浸感理论将沉浸感分为三个层次，每个层次对技术和内容设计有不同要求。感知沉浸 (Sensory Immersion) 是沉浸感的技术基础，由显示分辨率、帧率、视场角、音频质量等设备性能参数决定。
- 高感知沉浸要求 VR 头显分辨率达到 4K 以上、帧率不低于 90fps、视场角不小于 110 度。
- 叙事沉浸 (Narrative Immersion) 是沉浸感的内容核心，由故事内容的吸引力、情感共鸣和文化深度决定。
- Ababneh 指出，VR 和 AR 技术革命性地改变了人们参与和体验文化遗产的方式，但技术只是手段，内容和叙事才是核心。
- 挑战沉浸 (Challenge Immersion) 是沉浸感的交互引擎，由用户面临的任务难度和反馈机制决定。游戏化设计——如探索任务、解谜挑战、成就系统——可以增强挑战沉浸。

6.9.2 交互设计的文化适切性

- 文化遗产沉浸式体验的交互设计需要考虑文化适切性。不同文化背景的用户对交互方式有不同的偏好和期望——东方用户可能更偏好间接和含蓄的交互方式，西方用户可能更偏好直接和显性的交互方式。
- 交互设计应尊重文化差异，避免文化偏见。Petridis 等人在研究 Herbert 虚拟博物馆时提出的交互设计原则强调自然性、反馈性、引导性和可及性。

6.9.3 多感官体验的前沿探索

- 多感官体验是沉浸式体验设计的前沿方向。传统 VR/AR 体验主要依赖视觉和听觉，但人类的文化体验是多感官的——传统手工艺的触感、传统美食的味觉、宗教仪式的嗅觉都是文化遗产体验的重要组成部分。
- 前沿研究正在探索触觉反馈（力反馈手套、触觉表面）、嗅觉模拟（气味释放装置）和味觉模拟在文化遗产体验中的应用。
- 李建和张杰在分析 VR/AR 技术在历史文化街区中的应用时，介绍了古建筑数字化复原、历史文化街区虚拟全景漫游以及历史名人全息投影式再现互动等多个应用模式。

11

6.10 VR/AR/MR 技术评估方法论

6.10.1 用户体验评估方法体系

- VR/AR/MR 体验的评估需要综合运用多种方法。主观评价方法包括问卷调查 (如 SUS 可用性量表、 PQ 存在感问卷)、半结构化访谈和焦点小组讨论。
- 客观测量方法包括眼动追踪 (分析用户注意力分布)、脑电波 (EEG , 分析认知负荷和情绪反应)、心率变异性 (HRV , 分析压力和沉浸程度) 和皮肤电反应 (GSR , 分析情绪唤醒)。
- 行为分析方法包括用户行为日志分析、路径追踪和停留时间统计。 Trunfio 等人在研究博物馆混合现实体验时发现, MR 设备的功能元素对访客的沉浸式体验和体验后行为有显著影响。
- 这一发现表明, 技术评估不仅需要关注即时体验效果, 还需要关注体验后的行为变化 (如重访意愿、推荐意愿、学习成果等)。

6.10.2 技术性能评估指标

- VR/AR/MR 系统的技术性能评估指标包括：显示性能 (分辨率、帧率、视场角、色彩还原度)、追踪精度 (位置追踪精度、姿态追踪精度、延迟)、交互性能 (手势识别准确率、语音识别准确率、响应延迟) 和系统稳定性 (崩溃率、发热量、续航时间)。
- 这些指标的技术基线标准是确保用户基本体验质量的前提。

12

6.11 VR/AR/MR 在文化遗产教育中的应用

6.11.1 沉浸式文化遗产教育

- VR/AR/MR 技术为文化遗产教育提供了沉浸式学习环境。传统文化遗产教育以课堂讲授和教材阅读为主，学生被动接受信息。
- 沉浸式 VR 教育使学生可以 " 亲临 " 历史现场—— " 走进 " 敦煌洞窟观摩壁画、 " 参与 " 古代仪式体验文化、 " 操作 " 虚拟文物了解工艺。这种体验式学习显著提高了学习动机和知识保持率。

6.11.2 AR 增强的博物馆教育

- AR 技术在博物馆教育中的应用日益广泛。
- 通过 AR 导览应用，学生可以在观看实物展品的同时获取多媒体增强信息——三维复原动画展示文物的原始状态、交互式信息图层展示文物的历史背景、游戏化任务引导深度探索。
- Bailey-Ross 等人在研究博物馆数字内容创建时指出，数字交互技术是吸引访客参与的重要资源。

6.11.3 远程文化遗产教育

- VR 技术使远程文化遗产教育成为可能。偏远地区学校可以通过 VR 带学生 " 参观 " 世界顶级博物馆和文化遗产地，弥合教育资源差距。
- 于连伯指出，AR、VR 等先进技术对博物馆文化遗产的可视化呈现带来了崭新的视觉文化传播模式。

13

6.6 扩展现实 (XR) 技术的前沿发展与文化遗产应用

6.6.1 XR 技术融合的演进路径

- 扩展现实 (XR) 是 VR、AR 和 MR 的统称，代表了人机交互从 " 屏幕中介 " 向 " 空间计算 " 的范式转变。
- 近年来，XR 技术在硬件、软件和内容生态三个层面均取得了显著突破，为文化遗产的沉浸式体验提供了前所未有的技术可能。硬件层面的突破。
- 2024 年以来，以 Apple Vision Pro、Meta Quest 3、PICO 4 Ultra 为代表的新一代 XR 头显实现了以下关键进步：(1) 分辨率方面，
- Micro-OLED 显示技术使单眼分辨率达到 4K 级别，像素密度超过 3000 PPI，大幅减轻了 " 纱窗效应 "；
- (2) 透视 (Passthrough) 方面，全彩视频透视技术实现了混合现实的高质量融合，用户可在真实环境中叠加数字内容；(3) 交互方面，眼动追踪和手势识别成为标配，自然交互体验显著提升；
- (4) 轻量化方面，眼镜形态的 AR 设备 (如 XREAL Air 2 Ultra) 重量降至 80 克以下，为长时间使用创造了条件。软件层面的创新。
- (1) 空间计算操作系统 (如 visionOS) 为 XR 应用提供了统一的开发框架；
- (2) 实时渲染技术 (如 NVIDIA DLSS 3.5、Unreal Engine 5 的 Nanite 虚拟几何体系统) 使文化遗产场景的光影效果和几何细节达到了照片级真实感；

6.6.1 XR 技术融合的演进路径

- (3)AI 驱动的场景理解 (如 Nerf、 3D Gaussian Splatting) 使从照片自动生成可交互的 3D 文化遗产场景成为可能。内容生态的发展。文化遗产已成为 XR 内容生态的重要领域。
- 根据 Steam 平台 2024 年度报告，文化教育和博物馆类 VR 内容同比增长 35% ，增速仅次于游戏类。
- Google Arts & Culture 应用已支持 Apple Vision Pro ，用户可在空间计算环境中浏览全球博物馆藏品。

6.6.2 VR 在文化遗产保护中的深度应用模式

- 基于对全球 200 余个文化遗产 VR 项目的系统分析，可将 VR 应用归纳为以下五种深度模式：时空穿越模式。利用历史复原数据构建虚拟历史场景，允许用户 " 穿越 " 到不同历史时期体验文化遗产的原始状态。
- 典型案例如 " 数字圆明园 " 项目，基于历史文献和考古数据复原了圆明园在乾隆盛期的面貌，用户可在 VR 中漫步于西洋楼、大水法等已毁建筑之间。
- 该项目的核心挑战在于历史复原的准确性——每一个建筑构件、装饰纹样的复原都需要严谨的学术依据，VR 中的任何细节都可能引发学术争议。
- 微观探索模式。
- 将微观尺度的文化遗产 (如织物纤维、漆器断面、壁画颜料层) 放大至可交互的尺度，使用户能够 " 进入 " 文物内部观察其微观结构。
- 如故宫博物院与清华大学合作的 " 微观故宫 " VR 项目，用户可 " 缩小 " 至毫米尺度观察漆器的制作工艺层次，这种体验在实体博物馆中完全无法实现。
- 过程重现模式。
- 通过 VR 重现文化遗产的制作工艺过程，使用户能够 " 亲身参与 " 传统工艺的制作流程。
- 如日本文化厅支持的 " 传统工艺 VR " 系列项目，用户可在 VR 中体验陶器拉坯、漆器髹涂、木工雕刻等工艺过程，通过触觉反馈手套感受不同材质和工艺的力反馈差异。
- 多视角叙事模式。
- 在 VR 环境中提供多个叙事视角，用户可从不同角色 (如考古学家、修复师、古代工匠、当代参观者) 的视角体验同一文化遗产。

6.6.2 VR 在文化遗产保护中的深度应用模式

- 如 " 数字庞贝 "VR 项目允许用户分别以考古学家发掘视角、古罗马居民生活视角和现代修复师视角探索庞贝古城，每种视角提供不同的信息层次和交互方式。协作探索模式。
- 支持多名用户同时在同一 VR 空间中探索文化遗产，实现远程协作的沉浸式文化体验。
- 如英国自然历史博物馆的 "VR 科学俱乐部 " 允许多名学生在共享 VR 空间中协作探索恐龙化石，每名用户以虚拟形象出现并可进行语音交流。

6.6.3 AR 在文化遗产导览中的创新实践

- 增强现实 (AR) 技术在文化遗产导览中的应用已从早期的 " 信息叠加 " 发展为 " 智能增强 " 阶段。当前 AR 文化遗产导览的核心创新方向包括：场景智能识别与情境感知。
- 基于计算机视觉的 AR 系统可自动识别用户面前的文物或遗址，并推送相关的数字内容。
- 如敦煌莫高窟 AR 导览应用，用户举起手机对准壁画，系统自动识别壁画内容并叠加数字化的故事讲解、病害标注和历史背景信息。这种 " 场景触发 " 模式比传统的 " 二维码扫描 " 模式更加自然和无障碍。
- 空间锚定与持久 AR。
- 利用空间锚定技术 (如 ARKit 的 GeoAnchor、ARCore 的 Geospatial API)，AR 内容可固定在特定的地理坐标上，
- 实现 " 持久 AR " 效果——不同用户在不同时间访问同一地点时都能看到相同的 AR 内容。
- 这一技术为文化遗产遗址的 AR 增强提供了基础设施，如古罗马广场遗址的 AR 复原项目，游客可看到虚拟的古建筑叠加在现存废墟之上。多人共享 AR 体验。
- 通过 ARKit 的 Collaborative Session 或 ARCore 的 Cloud Anchors 技术，多名用户可在同一物理空间中共享 AR 体验。

6.6.3 AR 在文化遗产导览中的创新实践

- 如三星堆博物馆的 "AR 寻宝 " 活动，家庭成员可在展厅中共同寻找和收集虚拟文物，增强了参观的社交性和趣味性。

14

6.7 沉浸式体验设计的理论深化

6.7.1 沉浸感理论的多维度解析

- 沉浸感 (Immersion) 是文化遗产沉浸式体验设计的核心目标，但其概念常被混淆使用。
- 根据 Slater 和 Wilbur 的经典理论框架，需区分以下概念：
技术沉浸感 (System Immersion)：由技术系统的客观性能决定的沉浸程度，包括显示分辨率、视场角、刷新率、延迟等硬件指标。
这是沉浸感的基础，但并非充分条件——高配置设备不一定产生高沉浸感体验。
感知沉浸感 (Sensorimotor Immersion)：用户在虚拟环境中感知和行动的连贯程度。
当用户的身体动作能够产生符合预期的虚拟环境响应时，感知沉浸感增强。这一维度要求 VR 系统的追踪精度和响应速度达到人类感知阈值以下 (通常要求运动 - 光子延迟低于 20 毫秒)。
- 心理沉浸感 (Presence)：用户主观上 " 感觉自己真的在那个环境中 " 的程度，也称为 " 临场感 "。心理沉浸感是沉浸体验的最终目标，受技术因素、内容因素和个体因素的综合影响。
- 在文化遗产沉浸式体验设计中，三个层次的沉浸感需要协同设计。
- 例如， " 数字敦煌 " VR 项目通过 8K 高分辨率显示 (技术沉浸)、6 自由度空间追踪 (感知沉浸) 和壁画故事的沉浸式叙事 (心理沉浸) 的协同设计，实现了高水平的整体沉浸体验。

6.7.2 文化遗产沉浸式体验的情感设计

- 文化遗产的沉浸式体验不仅是技术问题，更是情感设计问题。
- Norman 提出的情感设计三层次理论——本能层 (Visceral) 、
- 行为层 (Behavioral) 和反思层 (Reflective)—— 可用于指导文化遗产沉浸式体验的情感设计： 本能层设计：关注用户的第一印象和直觉反应。
- 在文化遗产 VR 中，通过高质量的视觉渲染、空间音效和环境氛围营造，使用户在进入虚拟环境的瞬间产生 " 惊叹 " 反应。
- 如 " 微观故宫 "VR 中，当用户从宏观故宫全景 " 缩小 " 至微观漆器表面时，视觉尺度的剧烈变化产生了强烈的本能层冲击。行为层设计：关注用户与系统交互的流畅度和满足感。
- 在文化遗产沉浸式体验中，交互设计应遵循 " 自然映射 " 原则——用户的操作方式应与预期效果之间有直观的对应关系。如 VR 中 " 走近看细节 " " 拿起看背面 " 等操作与现实博物馆参观行为一致，降低了学习成本。
- 反思层设计：关注用户在体验后的反思和意义建构。文化遗产沉浸式体验的最终目标不是 " 好玩 " ，而是引发用户对文化遗产价值的深层思考。
- 通过在体验中设置反思节点 (如虚拟导览中的提问、体验后的分享环节) ，促进用户从 " 体验者 " 向 " 思考者 " 的转变。

15

6.8 技术评估与发展趋势展望

6.8.1 用户体验评估方法体系

- 文化遗产沉浸式体验的用户评估需要综合主客观方法：客观生理指标：心率变异性 (HRV)、皮肤电反应 (GSR)、脑电图 (EEG) 和眼动追踪等生理指标可客观反映用户的沉浸程度和情感反应。
- 如 Padfield 等在丹麦国家博物馆的 VR 展览评估中，使用 GSR 监测发现用户在 " 沉浸式维京船 " 体验中的情感唤醒度显著高于传统视频观看。
- 主观自报告量表：IPQ(iGroup Presence Questionnaire)、
- SUS(System Usability Scale) 和 PQ(Presence Questionnaire) 等标准化量表可量化评估用户的临场感和体验满意度。
- 行为数据分析：通过追踪用户在虚拟环境中的行为轨迹、注视热点、交互频率等数据，分析用户的行为模式和兴趣分布。
- 如 " 数字敦煌 "VR 项目通过热力图分析发现，用户在壁画细节区域的注视时间远超预期，指导了后续内容设计的优化。

6.8.2 元宇宙与文化遗产的未来图景

- 元宇宙概念为文化遗产的数字化保护和利用提供了新的想象空间。
- 文化遗产在元宇宙中的可能形态包括：数字孪生遗产地：通过对文化遗产地进行高精度数字化扫描，在元宇宙中创建精确的数字孪生体，可用于虚拟游览、保护监测、学术研究等多重目的。
- 如 " 数字长城 " 项目已建立了喜峰口长城段的毫米级精度数字孪生体，并在元宇宙平台中开放虚拟游览。
- 跨时空文化遗产汇聚：元宇宙可打破物理空间的限制，将分散于全球各地博物馆的文化遗产在虚拟空间中重新汇聚。
- 如 " 数字丝绸之路 " 元宇宙项目计划将沿线各国博物馆的丝路文物在虚拟空间中联合展出，构建跨时空的文化对话。
- 文化遗产 NFT 与数字所有权：基于区块链技术的 NFT(Non-Fungible Token) 为文化遗产数字资产的所有权确认和交易提供了新机制。
- 如乌菲兹美术馆曾将米开朗基罗的《多尼圆形》数字化版本铸造成 NFT 进行拍卖，引发了关于文化遗产数字资产化的伦理讨论。

16

6.9 文化遗产沉浸式体验的案例深度分析

6.9.1 卢浮宫 " 蒙娜丽莎：越界视野 "VR 体验

- 2024 年卢浮宫推出的 " 蒙娜丽莎：越界视野 "VR 体验是文化遗产沉浸式体验的标杆项目。
- 该项目利用超高分辨率扫描数据 (达到 1.4 亿像素)，通过 VR 技术使观众能够以前所未有的方式体验达 · 芬奇的这幅杰作：超越物理限制的近距离观察：在实体展厅中，
 - 观众需在防护栏外约 3 米处观看蒙娜丽莎，且停留时间受限。
 - VR 体验中，观众可 " 走近 " 画作至 10 厘米距离，观察笔触细节、颜料裂纹和修复痕迹。同时，红外成像数据层揭示了底层素描和修改痕迹，这是肉眼在原作前也无法看到的。
- 时空穿越式体验：VR 体验不仅展示画作现状，还通过 AI 修复技术重建了画作在 1503 年创作完成时的可能面貌，使观众能对比 500 年间的变化。
- 同时，虚拟环境中重建了达 · 芬奇的工作室，观众可在其中探索达 · 芬奇使用的颜料、工具和绘画技法。
- 多感官沉浸设计：除了视觉沉浸，VR 体验还整合了空间音效——模拟 16 世纪佛罗伦萨的环境声音 (街道声、工坊声、达 · 芬奇与模特对话声)，以及触觉反馈——通过触觉手套感受画布纹理和颜料厚度。
- 多感官整合大幅提升了临场感和情感共鸣。

6.9.2 中国大运河博物馆沉浸式展览体系

- 扬州中国大运河博物馆是国内沉浸式文化遗产展览的代表性案例，构建了多层次的沉浸式体验体系："运河上的舟楫"沉浸式体验：观众登上一艘 1:1 复原的清代漕船，
 - 船体内部通过投影映射 (Projection Mapping) 技术呈现运河两岸的流动风景。
 - 观众可在船舱中体验不同季节、不同时段运河航行，感受漕运生活的历史场景。
- "5G 大运河"全景体验：利用 5G+VR 技术，实时连接大运河沿线 6 省 2 市的遗产点摄像头，观众可在博物馆中实时观看运河各段的实景，实现了 "时空压缩" 的沉浸式体验。
- "河之恋"沉浸式剧场：360 度环幕配合地幕投影和空间音频，观众被完全包围在虚拟运河场景中，体验从古至今运河变迁的宏大叙事。
- 该剧场的设计体现了 "环境叙事" 的理念——观众不是在 "看" 展览，而是在 "经历" 历史。

17

6.10 沉浸式体验的技术标准与评估体系

6.10.1 技术性能标准

- 文化遗产沉浸式体验的技术性能标准可从以下维度定义：视觉性能：(1) 分辨率——VR 头显单眼分辨率不低于 2K(2048×2048)，AR 眼镜不低于 1080p；
- (2) 视场角——VR 不低于 90 度 (推荐 110 度以上)，AR 不低于 40 度；(3) 刷新率——不低于 90Hz(推荐 120Hz)，以减少视觉疲劳和晕动症；
- (4) 色彩空间——支持 sRGB 或 DCI-P3 色域，色准 $\Delta E < 5$ 。追踪性能：(1) 定位精度——6 自由度追踪，位置精度不低于 3mm，旋转精度不低于 0.5 度；
- (2) 追踪范围——支持至少 3m×3m 的空间范围；(3) 延迟——运动 - 光子延迟 (M2P latency) 不低于 20ms，以避免晕动症。
- 音频性能：(1) 空间音频——支持头部相关传递函数 (HRTF) 渲染的 3D 空间音频；(2) 采样率——不低于 48kHz；(3) 声场定位精度——方位角误差不超过 5 度。

6.10.2 体验质量评估框架

- 沉浸式体验的质量评估应涵盖技术质量、内容质量和体验效果三个层面：技术质量评估：通过客观测试工具测量系统的技术性指标。
- 如使用 Frame Time Analyzer 测量帧率和延迟，使用 SpectraCal CalMAN 测量色彩准确性。内容质量评估：通过专家评审评估数字内容的学术准确性、艺术表现力和叙事连贯性。
- 评估维度包括：历史准确性、文化敏感性、视觉美学、叙事逻辑、交互设计等。体验效果评估：通过用户测试评估体验的实际效果。
- 评估方法包括：(1) 临场感量表 (IPQ)——测量空间临场感、参与度和真实感；(2) 情感反应测量——使用 SAM(Self-Assessment Manikin) 量表测量愉悦度、唤醒度和支配度；
- (3) 行为观察——记录用户在体验中的行为模式 (探索范围、互动频率、停留时间等)；(4) 事后访谈——收集用户的主观感受和改进建议。

18

6.11 文化遗产沉浸式体验的伦理考量

6.11 文化遗产沉浸式体验的伦理考量

- 沉浸式技术在文化遗产领域的应用也需要伦理考量：原真性与沉浸感的张力：沉浸式体验追求强烈的临场感，可能需要对历史场景进行 " 戏剧化 " 处理——添加不存在的光影效果、音效氛围或互动元素。
- 这些处理可能偏离历史原真性，需要在沉浸感和原真性之间寻求平衡。建议在体验中明确标注哪些元素是历史事实、哪些是艺术想象。
- 文化敏感性与沉浸体验：某些文化遗产内容 (如宗教仪式、祭祀场景) 具有文化敏感性，沉浸式体验可能让用户 " 侵入 " 不应接触的文化空间。
- 如 VR 重建的印第安人圣殿仪式，即使出于教育目的，也可能冒犯源文化群体。因此，沉浸式体验的设计应尊重源社区的文化规范，必要时设置访问限制。
- 数字疲劳与体验过载：长时间沉浸式体验可能导致感官过载和数字疲劳。特别是文化遗产内容信息密度高，用户在短时间内接收大量视觉和听觉信息，容易产生认知超载。
- 应设计适当的节奏和休息节点，避免 " 信息轰炸 " 。

19

6.12 文化遗产沉浸式体验的产业化路径

6.12.1 产业链分析

- 文化遗产沉浸式体验的产业链涉及多个环节：上游——内容创作与技术开发：包括文化遗产数字化采集 (3D 扫描、摄影测量)、数字内容创作 (3D 建模、动画制作、程序开发) 和沉浸式体验设计 (交互设计、叙事设计、空间设计)。
- 上游环节的核心挑战是跨学科协作——技术人员需要理解文化遗产的学术内涵，人文学者需要掌握数字技术的可能性。中游——平台运营与集成服务：包括沉浸式体验平台的运营维护、系统集成和内容分发。
- 中游环节的核心挑战是商业模式的可持续性——沉浸式体验内容制作成本高，但用户付费意愿参差不齐，需要找到合理的盈利模式。
- 下游——终端应用与用户服务：包括博物馆 / 遗产地的沉浸式体验服务、文化旅游目的地的沉浸式项目、教育机构的沉浸式教学应用等。
- 下游环节的核心挑战是用户接受度——沉浸式设备的使用门槛、体验成本和舒适度都影响用户的接受程度。

6.12.2 商业模式创新

- 文化遗产沉浸式体验的商业模式正在探索中，主要模式包括： B2G 模式 (面向政府 / 文博机构)：为博物馆和遗产地定制开发沉浸式体验项目。这是当前最主要的商业模式，项目资金主要来源于政府财政拨款。
- 优点是项目金额大、合作稳定，缺点是项目周期长、受财政预算波动影响大。 B2C 模式 (面向终端消费者)：开发面向公众的沉浸式体验产品，如 VR 文化遗产体验应用、 AR 导览 APP 等。
- 优点是市场潜力大、可快速迭代，缺点是用户付费意愿不确定、市场竞争激烈。 B2B2C 模式 (通过机构触达消费者)：为文旅企业、教育机构等提供沉浸式内容和技术解决方案，再由这些机构服务于最终用户。
- 如为旅行社提供 VR 遗产地体验内容，旅行社将其作为旅游产品的一部分向游客提供。 IP 授权模式：将文化遗产沉浸式体验内容进行 IP 化运营，授权给游戏公司、影视公司、文创企业等进行二次开发。
- 如 " 数字敦煌 "IP 已授权用于游戏 (《王者荣耀》敦煌皮肤)、影视和文化创意产品，形成了多元化的 IP 变现路径。

20

6.13 文化遗产 VR/AR 体验的教育应用

6.13.1 VR/AR 在文化遗产教育中的价值

- VR/AR 技术在文化遗产教育中具有独特价值：时空穿越式学习：VR 可以将学习者带到无法实地到访的历史场景中——如穿越到唐代长安城体验当时的社会生活，
 - 或 " 进入 " 已经消失的建筑内部观察其空间结构。
- 这种 " 时空穿越 " 式学习比传统的文字描述和图片展示更能激发学习兴趣和记忆留存。微观尺度探索：VR 可以缩放尺度，让学习者从宏观到微观多尺度观察文化遗产。
 - 如从全景视角观看一幅壁画，再放大到微观层面观察颜料颗粒和笔触细节，这种多尺度探索有助于培养学习者的观察力和分析能力。
- 过程性学习：AR/VR 可以模拟文化遗产的制作过程，让学习者 " 亲手 " 参与制作。
 - 如 VR 陶艺模拟让学习者通过手势操作体验拉坯、修坯、上釉、烧制等陶器制作全过程，这种 " 做中学 " 的模式比 " 看中学 " 更有效。
- 协作式学习：VR 支持多名学习者同时在同一虚拟空间中学习，通过语音交流和协作操作完成学习任务。如多名学生可以在 VR 中协作探索一个考古遗址，分工记录不同区域的信息并汇总讨论。

6.13.2 教育应用的设计原则

- 文化遗产 VR/AR 教育应用的设计应遵循以下原则：学习目标导向：每个 VR/AR 教育应用应明确学习目标——知识获取 (了解文物背景知识) 、技能培养 (学习传统工艺基本操作) 、
- 情感态度 (增强文化认同和保护意识)—— 不同的学习目标对应不同的设计策略。
- 适龄设计：不同年龄段学习者的认知能力和操作能力不同，VR/AR 内容应进行适龄调整。面向小学生的应用应简化操作界面、增加趣味性元素；面向大学生的应用可增加学术深度和自主探索空间。
- 教师支持：VR/AR 教育应用应提供教师管理工具——创建班级、分配任务、监控学习进度、评估学习效果。
- 教师应能在 VR/AR 体验前后嵌入课堂教学环节，形成 " 课前导入 -VR 体验 - 课后讨论 " 的完整教学闭环。
- 技术可及性：考虑学校的技术条件差异，VR/AR 教育应用应支持从高端 VR 头显到普通手机 / 平板的多种设备。
- 对于条件有限的学校，可提供基于 Cardboard 的低成本 VR 方案或基于 WebAR 的无设备方案。

21

6.15 延伸阅读与体验建议

6.15 延伸阅读与体验建议

- 延伸阅读：建议阅读 Slater 和 Wilbur 关于临场感研究的经典论文，理解沉浸感的心理学基础。
- 同时推荐阅读 Jenkins 的《Convergence Culture》，了解跨媒介叙事理论在文化遗产中的应用潜力。
- 对于技术方面，推荐关注 ACM SIGGRAPH 会议上文化遗产 VR/AR 相关的最新论文。体验建议：本章涉及的 VR/AR 技术需要亲身体验才能深入理解。
- 建议学生：(1) 使用 Google Cardboard 配合智能手机体验基础 VR 内容，了解低成本 VR 的技术原理和体验局限；
- (2) 参观配备 VR/AR 设备的博物馆或展览（如故宫数字文物库 VR 体验、敦煌 VR 展），体验专业级沉浸式文化遗产展示；
- (3) 使用 Unity 或 Unreal Engine 尝试创建一个简单的文化遗产 VR 场景（如虚拟展览室），通过实践理解技术实现的关键环节。
- 工具推荐：对于希望深入学习 VR/AR 开发的学生，推荐以下工具链：Unity + VRTK(VR 开发)、AR Foundation + ARCore/ARKit(AR 开发)、Three.js/WebXR(Web3D 开发)、Blender(3D 建模)。

6.15 延伸阅读与体验建议

- 这些工具均有丰富的文化遗产相关教程和开源项目可供参考。

22

6.16 沉浸式体验的晕动症问题与解决方案

6.16 沉浸式体验的晕动症问题与解决方案

- 晕动症 (Motion Sickness) 是文化遗产 VR 体验中常见的用户体验问题, 约 15%-40% 的用户在首次使用 VR 时会经历不同程度的晕动症状 (头晕、恶心、眼疲劳)。
- 这一问题直接影响文化遗产 VR 体验的普及和接受度: 晕动症成因: VR 晕动症的主要成因是 " 感觉冲突 "—— 视觉系统感知到的运动信息与前庭系统 (内耳平衡器官) 感知到的运动信息不一致。
- 当 VR 环境中用户 " 移动 " 但身体实际静止时, 大脑接收到矛盾的运动信号, 引发晕动反应。
- 缓解策略: (1) 技术优化——提高帧率 ($\geq 90\text{fps}$)、降低延迟 ($M2P < 20\text{ms}$)、提高分辨率 (减少纱窗效应) 可减轻晕动症;
- (2) 设计策略——避免强制性的相机移动、提供 " 传送 " 式移动 (用户选择目的地瞬间到达)、使用 " 隧道视野 " (移动时缩小视场角) 等设计手段减少视觉 - 前庭冲突;
- (3) 用户适应——大部分用户经过 3-5 次 VR 体验后晕动症状会显著减轻, 可通过渐进式体验 (从短时间、低运动量内容开始) 帮助用户适应。
- 文化遗产场景的特殊考量: 文化遗产 VR 体验中, 用户通常需要在虚拟空间中 " 行走 " (如漫游虚拟博物馆), 这比 " 坐定式 " 体验更容易引发晕动症。
- 替代方案包括: (1) " 轨道式 " 漫游——用户沿预设路径自动移动, 类似乘坐观光车; (2) " 鸟瞰式 " 浏览——从高空俯视文化遗产全景, 减少运动感知冲突;

6.16 沉浸式体验的晕动症问题与解决方案

- (3)" 缩放式 " 探索——通过放大 / 缩小改变观察尺度，而非物理移动。

23

6.17 XR 硬件的发展趋势与文化遗产适配

6.17 XR 硬件的发展趋势与文化遗产适配

- XR 硬件的发展趋势对文化遗产应用有直接影响：(1) 轻量化——AR 眼镜正从 " 头盔式 " 向 " 眼镜形态 " 演进，重量已降至 80 克以下，预计未来 2-3 年内将出现重量低于 50 克的消费级 AR 眼镜，
 - 使文化遗产 AR 导览的长时间使用成为可能。
- (2) 视场角扩展——VR 头显的视场角正从 90 度向 120-150 度扩展，更大的视场角能提供更强的沉浸感。
- (3) 眼动追踪标准化——眼动追踪已成为新一代 VR 头显的标配功能，可用于注视点渲染 (仅在用户注视区域渲染高清画面，提升性能) 和注视点交互 (通过眼神选择和确认操作) 。
- (4) 社交功能——新一代 VR 头显支持面部表情追踪和混合现实透视，使多人 VR 体验中的虚拟形象更加自然和富有表情。在文化遗产沉浸式体验的实践中，成本控制是一个关键考量。
 - 高质量 VR 内容的制作成本通常在每分钟 5 至 20 万元人民币，一个完整的文化遗产 VR 体验项目的制作成本可达数百万元。AR 应用的开发成本相对较低但也需要数十万元至百万元级别。
 - 降低成本的策略包括：利用游戏引擎的现成资产和插件减少定制开发；采用模块化设计实现内容复用；利用 AI 生成技术辅助场景建模和纹理制作。
 - 随着技术工具的成熟和内容生态的丰富，文化遗产沉浸式体验的制作成本有望逐步降低，使更多文博机构能够负担。

- 本章从 VR/AR/MR 技术原理、文化遗产应用模式、沉浸式体验设计、技术评估与发展趋势、教育应用、产业化路径、伦理考量等多个维度，
- 系统论述了扩展现实技术在文化遗产保护与活化中的理论与实践。
- XR 技术是 G.U.A.R.D. 框架中 U(Utilization) 维度的核心技术支撑，为文化遗产的创造性转化和创新性发展提供了前所未有的体验可能性。
- XR 技术在文化遗产领域的应用正在从 " 技术展示 " 阶段走向 " 深度融合 " 阶段——技术不再是外在的展示工具，而是融入文化遗产保护、传承和传播全过程的内在要素。
- 未来，随着空间计算、脑机接口、全息显示等前沿技术的成熟，文化遗产的沉浸式体验将变得更加自然、智能和个性化。

- ? 2.(理解) 解释沉浸感三层次理论及其对文化遗产体验设计的指导意义。 3.(应用) 为一个考古遗址公园设计 AR 导览系统, 说明功能模块和技术方案。
- 4.(分析) 比较 VR 虚拟重建和 AR 虚拟复原在文化遗产展示中的不同优势和局限。 5.(评价) 评估 "元宇宙 + 文化遗产" 概念的技术可行性和文化风险。
- 6.(创造) 设计一个融合 VR 和 MR 的博物馆沉浸式展览, 包含叙事策略和交互方案。

- 1. Bekele M K, Pierdicca R, Frontoni E, et al.. A Survey of Augmented, Virtual,
- 2. Baviera López E, Llopis Verdú J, Martínez Piqueras J, et al.. Heritage Dissem
- 3. Alboul L, Beer M, Nisiotis L. Robotics and Virtual Reality Gaming for Cultura
- 4. Haydar M, Roussel D, Otmane S, et al.. Virtual and augmented reality for cult
- 5. Ababneh A. Digital solutions for cultural heritage: preservation, interpretat
- 6. Trunfio M, Jung T, Campana S. Mixed reality experiences in museums: Exploring

谢谢聆听 · 下章再见

安顺学院旅游管理学院 · 数字文旅专业系列教材