

数字文旅专业系列教材 · 教学课件

VR/AR 沉浸式文旅场景设计

第 5 章 实时渲染与可视化技术

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

- 5.1 渲染管线基础
- 5.2 实时渲染优化策略
- 5.3 基于 NeRF 的神经渲染技术
- 5.4 光照模拟与全局光照
- 5.5 移动端 AR/VR 低功耗渲染
- 5.6 案例分析
- 5.7 国际比较与经验借鉴
- 5.8 实践案例深度分析
- 5.9 理论深化与前沿探讨
- 5.10 渲染技术与文化真实性的关系
- 5.10 VR/AR 渲染中的色彩管理
- 5.11 渲染性能优化深度策略
- 5.12 VR 渲染的特殊挑战
- 5.13 渲染引擎的选择策略

- 掌握开篇的核心概念与方法
- 掌握 5.1 渲染管线基础的核心概念与方法
- 掌握 5.2 实时渲染优化策略的核心概念与方法
- 掌握 5.3 基于 NeRF 的神经渲染技术的核心概念与方法
- 能够结合文旅实际案例分析本章知识的应用场景

01

开篇

- 1. 识记：掌握光栅化、光线追踪、路径追踪等渲染管线的基本原理，了解 LOD、遮挡剔除等优化策略。
- 2. 理解：理解 NeRF 神经渲染技术的工作原理及其在文旅场景中的应用潜力。
- 3. 应用：能够为特定 VR/AR 文旅场景选择合适的渲染技术路线并制定优化策略。
- 4. 分析：分析移动端 AR/VR 低功耗渲染的技术挑战和解决路径。
- 5. 评价：评估渲染质量与帧率之间的权衡对用户体验的影响。
- 6. 创造：设计一个面向文化遗产场景的实时渲染优化方案。
- 导入案例： Unity3D 引擎在东关街 VR 复原中的渲染实践
- 闻婧和张乃中在设计大连东关街建筑遗迹 VR 复原系统时，面对的核心挑战是大场景虚拟仿真中有限系统资源与模型精细程度之间的矛盾 [8]。

- 他们采用 Unity3D 引擎为平台，运用多元化建模、几何优化、LOD 分级、Light Probes 光照探头等关键技术，在不牺牲视觉品质的前提下实现了大场景的流畅渲染。
- 这一案例揭示了实时渲染技术在沉浸式文旅场景中的核心地位——渲染质量直接决定沉浸感的生成，而渲染性能则影响用户体验的流畅度。

02

5.1 渲染管线基础

5.1.1 光栅化渲染

- 光栅化（Rasterization）是当前实时渲染的主流技术，其核心是将三维几何数据转换为二维像素阵列。光栅化渲染管线包括顶点处理（坐标变换）、图元装配、光栅化、片段着色和输出合并等阶段。
- 光栅化的优势在于计算效率高，能够在实时条件下处理复杂场景，是 VR/AR 应用的首选渲染方案。

5.1.2 光线追踪

- 光线追踪（Ray Tracing）通过模拟光线在场景中的传播路径来计算像素颜色，能够生成物理正确的反射、折射和阴影效果。与光栅化相比，光线追踪的视觉质量更高，但计算量也大得多。
- 近年来，NVIDIA RTX 系列 GPU 的硬件光线追踪加速使实时光线追踪成为可能，为沉浸式文旅场景的视觉品质提升开辟了新路径。

5.1.3 路径追踪

- 路径追踪（Path Tracing）是光线追踪的扩展，通过蒙特卡洛积分模拟全局光照效果，能够生成照片级真实的渲染结果。路径追踪主要用于离线渲染（如电影特效），在实时应用中仍受限于计算性能。
- 然而，随着 AI 降噪技术的进步，实时路径追踪正逐步变为现实。

03

5.2 实时渲染优化策略

5.2.1 LOD （ Level of Detail ） 技术

- LOD 技术根据物体与摄像机的距离动态切换不同精度的模型版本——近距离使用高精度模型，远距离使用简化模型。这一技术在文化遗产大场景渲染中至关重要。
- 闻婧和张乃中在东关街 VR 复原中即采用了 LOD 分级技术 [8]。

5.2.2 遮挡剔除与视锥剔除

- 遮挡剔除（Occlusion Culling）跳过被其他物体遮挡的渲染对象，视锥剔除（Frustum Culling）跳过摄像机视野外的渲染对象。
- 这两种技术能够大幅减少需要处理的几何数据量，提升渲染性能。在古建筑群等复杂场景中，遮挡剔除的效果尤为显著。

5.2.3 实例化渲染

- 实例化渲染（Instanced Rendering）允许用一次绘制调用渲染多个相同的几何体，适用于城墙砖纹、柱廊、瓦片等重复性元素的批量渲染。

5.2.4 纹理优化

- 纹理优化包括纹理压缩（如 ASTC、ETC2 格式）、纹理流式加载（按需加载不同分辨率的纹理）、纹理图集（将多张小纹理合并为一张大纹理）等技术。

04

5.3 基于 NeRF 的神经渲染技术

5.3.1 NeRF 原理

- 神经辐射场（Neural Radiance Fields, NeRF）通过多层感知机（MLP）隐式表示场景的三维结构和外观。
- 给定一个空间位置和观察方向，NeRF 网络输出该点的颜色和体密度，通过体渲染方程合成任意视角的图像。

Li 等学者的 RT-NeRF 研究展示了在移动设备上实现实时神经辐射场渲染的可能性 [1]。

5.3.2 NeRF 在文旅中的应用前景

- NeRF 在文化遗产数字化中的应用前景广阔：相比传统网格 + 纹理的表示方式，NeRF 能够更好地处理半透明材质（如玻璃、薄纱）、复杂光照（如衍射、散射）和细节丰富的表面（如雕刻、壁画）。
- 此外，NeRF 的隐式表示天然支持多分辨率渲染，无需手动制作 LOD。

5.3.3 NeRF 的当前局限

- NeRF 技术仍面临训练时间长、存储体积大、动态场景支持有限等挑战。在文旅实时应用中，NeRF 的推理速度是关键瓶颈——当前大多数 NeRF 方法无法达到 VR 所需的 90fps 刷新率。
- RT-NeRF 等研究正在通过模型压缩和硬件加速来解决这一问题 [1]。

05

5.4 光照模拟与全局光照

5.4.1 全局光照原理

- 全局光照（Global Illumination, GI）模拟光线在场景中的多次弹射，包括直接光照和间接光照。直接光照是从光源直接到达表面的光线；
- 间接光照是经过一次或多次反射后到达表面的光线。全局光照能够生成更真实的阴影、色彩溢出和环境光效果。

5.4.2 实时 GI 技术

- 实时 GI 技术包括光照探头（Light Probes）、反射探头（Reflection Probes）、屏幕空间全局光照（SSGI）和基于体素的 GI 等。
- 闻婧和张乃中在东关街 VR 复原中使用的 Light Probes 就是一种实时 GI 技术 [8]。

5.4.3 烘焙光照

- 对于静态场景，烘焙光照（Baked Lighting）是更高效的选择——将光照计算结果预计算并存储在光照贴图中，运行时只需查找即可。文化遗产场景中，建筑和地形通常是静态的，非常适合烘焙光照。

06

5.5 移动端 AR/VR 低功耗渲染

5.5.1 移动端渲染的挑战

- 移动端 AR/VR 面临计算能力有限、散热能力不足、电池续航有限等挑战。Ryu 等学者提出的低功耗神经图形系统展示了在移动设备上实现即时 3D 建模和实时渲染的可能性 [2]。

5.5.2 低功耗渲染策略

- 移动端低功耗渲染策略包括：简化着色器（使用移动端专用的简化着色器）、降低渲染分辨率（通过 foveated rendering 技术只在高分辨率渲染注视点区域）、使用前向渲染替代延迟渲染等。

5.5.3 云渲染

- 云渲染将计算密集的渲染任务卸载到云端服务器，将渲染结果以视频流的形式传输到移动设备。5G 网络的低延迟特性使云渲染成为移动 VR 的可行方案，但网络稳定性和延迟仍是挑战。
- Tian 和 Zhao 在云计算资源管理研究中讨论了云渲染的资源调度优化问题 [5]。

07

5.6 案例分析

5.6 案例分析

- 案例一： Unity3D 在东关街 VR 复原中的渲染实践
- 闻婧和张乃中基于 Unity3D 引擎的大连东关街 VR 复原系统 [8]，综合运用多元化建模、几何优化、LOD 分级、Light Probes 光照探头等技术，展示了实时渲染优化策略在文化遗产场景中的系统性应用。
- 案例二： RT-NeRF 移动端实时神经渲染
- Li 等学者的 RT-NeRF 研究 [1] 展示了在移动 AR/VR 设备上实现实时神经辐射场渲染的技术路径，为高质量文化遗产场景的移动端渲染提供了新方案。
- 案例三：低功耗神经图形系统
- Ryu 等学者提出的低功耗神经图形系统 [2] 通过分段哈希空间修剪等技术，在移动设备上实现了即时 3D 建模和实时渲染，为移动 AR 文旅应用提供了硬件层面的技术支撑。
- 国际比较与经验借鉴

5.6 案例分析

- 渲染技术的产业化差距
- 在渲染引擎和 GPU 硬件方面，北美企业（如 Unity Technologies, Epic Games, NVIDIA, AMD ）处于全球领先地位。
- 中国在自研渲染引擎和 GPU 芯片方面仍有较大差距，但在应用层面的创新（如文化遗产场景的渲染优化）具有独特优势。
- 理论深化与前沿探讨
- 可微渲染
- 可微渲染（ Differentiable Rendering ）使渲染过程可微分，可以与深度学习训练无缝集成。这一技术在逆向渲染（从图像反推材质和光照参数）和 AI 辅助内容生成方面具有巨大潜力。
- AI 辅助渲染
- AI 降噪技术（如 NVIDIA DLSS ）已经能够在保持视觉质量的同时大幅提升渲染帧率。未来， AI 可能在纹理生成、光照估计、场景理解等渲染环节发挥更大作用。

08

5.7 国际比较与经验借鉴

5.7.1 渲染引擎的产业格局

- 全球渲染引擎市场由 Unity Technologies （ Unity3D ） 和 Epic Games （ Unreal Engine ） 主导。
- Unity3D 在移动端和跨平台 VR/AR 开发中占据优势地位，其 C# 编程语言和丰富的资源商店使其成为文旅应用开发的首选。
- Unreal Engine 5 的 Nanite 虚拟几何体系统和 Lumen 全局光照系统在视觉品质方面树立了新标准，特别适合高保真文化遗产场景的渲染。
- 中国也在发展自主渲染引擎，如 Cocos 引擎和 LayaAir 引擎，但在技术成熟度和生态丰富度方面仍有差距。
- 在文旅应用中，渲染引擎的选择需要考虑目标平台（ PC/ 移动 / 独立 VR ）、团队技能栈、视觉品质要求和开发效率等多个因素。

5.7.2 GPU 硬件的竞争格局

- GPU 是实时渲染的核心硬件。NVIDIA 在专业 VR 渲染领域占据主导地位，其 RTX 系列 GPU 的硬件光线追踪加速和 DLSS AI 超分辨率为高品质 VR 渲染提供了强大支持。
- AMD 在消费级 GPU 市场有一定份额，但在 VR 专业领域仍落后于 NVIDIA。
- 移动端 GPU 方面，高通 Snapdragon 系列在独立 VR 头显中广泛使用，其 Adreno GPU 为移动 VR 渲染提供了基础算力。

5.7.3 开源渲染生态

- 开源渲染生态的发展为 VR/AR 文旅提供了低成本方案。
- Blender 的 EEVEE 实时渲染引擎、Godot 引擎的渲染管线、以及 Three.js 的 WebGL 渲染，都为资源有限的文旅项目提供了可行的技术选择。
- 特别是 WebXR 技术的发展，使得基于浏览器的 VR/AR 体验成为可能，大大降低了用户的硬件门槛。

09

5.8 实践案例深度分析

5.8 实践案例深度分析

- 案例一： Unity3D 在东关街 VR 复原中的渲染优化详解
- 闻婧和张乃中的东关街 VR 复原项目 [8] 是一个渲染优化技术系统应用的典型案例。项目的核心技术决策包括：
 - 建模策略：根据建筑的重要性和观赏距离，将模型分为三个精度级别——核心建筑（如标志性庙宇、商铺）采用高精度手工建模，次要建筑（如普通民宅）采用中等精度建模，远景建筑采用简体量模型。
 - LOD 系统：每栋建筑制作 3-4 个 LOD 级别。LOD0（高精度， <10 米使用）包含完整的建筑细节； LOD1（中精度， 10-30 米使用）保留主要轮廓和中度细节；
 - LOD2（低精度， 30-100 米使用）仅保留体量轮廓； LOD3（极简， >100 米使用）为简单方块。
 - 光照策略：采用 " 烘焙 + 实时 " 混合方案。静态光源（如太阳光的主光照）烘焙到光照贴图中，动态光源（如火把、灯笼）使用实时计算。 Light Probes 为动态物体（如游客化身）提供间接光照近似。
 - 材质优化：使用移动端优化的着色器，减少纹理采样次数；对重复出现的材质（如砖墙、瓦片）使用纹理图集合并；对透明物体（如窗户纸）使用 alpha cutout 替代 alpha blend。
- 案例二： RT-NeRF 移动端实时神经渲染的前景

5.8 实践案例深度分析

- Li 等学者的 RT-NeRF 研究 [5] 代表了神经渲染在移动 VR 中的前沿探索。RT-NeRF 的技术创新包括：分段哈希空间修剪（SHSP）加速神经网络的推理速度；
- 模型压缩技术将 NeRF 模型大小从数百 MB 压缩到数十 MB；硬件感知的推理调度优化 GPU 内存使用。
- 这些技术使在移动 VR 头显上实时渲染 NeRF 成为可能，为高质量文化遗产场景的移动端渲染开辟了新路径。
- 案例三：低功耗神经图形系统的硬件创新
- Ryu 等学者提出的低功耗神经图形系统 [2] 从硬件层面解决了移动 AR/VR 的渲染功耗问题。该系统的核心创新是一种专用神经网络加速器，能够在极低功耗下完成 3D 建模和实时渲染。
- 虽然这一技术仍处于实验室阶段，但它预示着未来的移动 VR/AR 设备可能集成专用的神经渲染芯片，从根本上解决移动端渲染性能不足的问题。

10

5.9 理论深化与前沿探讨

5.9.1 可微渲染与逆向重建

- 可微渲染（Differentiable Rendering）使渲染过程可微分，可以与深度学习训练无缝集成。
- 这一技术在文化遗产数字化中有重要应用——通过逆向渲染，可以从少量历史照片中反推文化遗产的三维模型、材质参数和光照条件。这为已消失文化遗产的数字复原提供了全新的技术路径。

5.9.2 AI 超分辨率渲染

- AI 超分辨率技术（如 NVIDIA DLSS）通过深度学习从低分辨率渲染结果重建高分辨率图像，在保持视觉质量的同时大幅提升渲染帧率。
- 在 VR 文旅场景中，DLSS 等技术可以在移动 VR 头显上实现接近 PC 级 VR 的视觉品质，显著缩小移动端与 PC 端之间的渲染质量差距。

5.9.3 光场显示与真三维渲染

- 光场显示技术不需要用户佩戴特殊眼镜即可看到立体影像，被认为是 VR/AR 显示的终极形态。光场显示在文化遗产展示中有独特优势——多个游客可以同时从不同角度观看同一虚拟文物，无需各自佩戴设备。
- 然而，光场显示的计算需求远超传统渲染，其商业化仍面临重大挑战。

5.9.4 渲染质量评估标准

- 沉浸式文旅场景的渲染质量评估需要建立标准化指标体系。
- 评估维度应包括：几何精度（模型与实物的偏差）、纹理质量（分辨率、色彩还原、无缝程度）、光照真实感（阴影、反射、间接光的准确性）、运动流畅度（帧率、
- 帧时间稳定性）和感官一致性（视觉与其他感官的一致程度）。
- 标准化的评估体系有助于在不同项目之间进行客观比较，促进行业质量提升。

11

5.10 渲染技术与文化真实性的关系

5.10.1 视觉真实性与文化真实性

- 渲染质量追求的 " 视觉真实性 " 与文化遗产的 " 文化真实性 " 是两个不同的概念。视觉真实性指渲染图像在视觉上与实物或历史原貌的相似程度，是技术层面的指标。
- 文化真实性指数字呈现对文化遗产文化意义的忠实程度，是文化层面的指标。高视觉真实性不等于高文化真实性——一个视觉逼真但文化解读错误的 VR 体验，比一个视觉简朴但文化准确的 AR 导览更危险。

5.10.2 渲染风格的选择

- 文化遗产的渲染风格选择是一个文化和美学决策。写实风格（ Photorealistic ）追求视觉上的高度逼真，适合需要精确呈现文物形态的场景。
- 风格化渲染（ Stylized Rendering ）采用艺术化的视觉风格（如水墨风、油画风），适合强调文化意境而非物理形态的场景。
- 渲染风格的选择应当由文化目标驱动，而非由技术能力决定—— " 能做多逼真就做多逼真 " 不是正确的设计原则。

5.10.3 历史复原中的渲染伦理

- 在历史场景的虚拟复原中，渲染技术面临一个伦理困境：对于有充分历史依据的部分，应当尽可能写实渲染；对于缺乏依据的 " 创造性补充 " 部分，应当在视觉上有所区分，避免与有据可查的复原混淆。
- 这种 " 诚实渲染 " 的伦理要求渲染设计不仅要追求视觉品质，还要承担文化诚信的责任。

12

5.10 VR/AR 渲染中的色彩管理

5.10.1 色彩空间与色彩管理

- VR/AR 渲染中的色彩管理是一个常被忽视但至关重要的议题。不同的显示设备（VR 头显的 OLED 屏、AR 眼镜的微型显示屏、移动设备的 LCD/OLED 屏）具有不同的色彩还原能力和色域范围。
- 如果渲染过程中不进行色彩管理，同一场景在不同设备上的色彩表现可能差异显著。
- 色彩管理的核心是色彩空间的转换——从渲染空间的线性色彩（Linear Color Space）到显示设备色彩空间的转换。
- 在 Unity3D 中，使用线性渲染管线配合合适的色彩空间转换可以确保色彩在不同设备上的一致性。

5.10.2 文化遗产的色彩还原

- 文化遗产的色彩还原是一个特殊的挑战——文物的原始色彩可能与现存色彩不同（如褪色、变色），虚拟复原需要根据考古研究和化学分析推断原始色彩。
- 这种色彩推断的不确定性应当在渲染中有所体现——例如，对高置信度的色彩使用写实渲染，对低置信度的色彩使用风格化或半透明渲染，使观众能够区分 " 有据可查的色彩 " 和 " 推测性的色彩 "。

5.10.3 高动态范围成像（HDRI）

- 高动态范围成像技术能够捕捉和显示比普通图像更宽的亮度范围。
- 在文化遗产场景的渲染中，HDRI 技术可以用于：环境光捕获（在遗址现场拍摄 HDRI 全景图作为环境光源）、光照模拟（使用 HDRI 天空盒模拟不同时间段和天气条件的光照）、
- 以及材质校准（使用 HDRI 参考图校准渲染材质的色彩和反射属性）。

13

5.11 渲染性能优化深度策略

5.11.1 GPU 性能剖析

- 渲染性能优化的第一步是 GPU 性能剖析——识别渲染管线的瓶颈所在。
- GPU 性能剖析工具（如 RenderDoc、Unity Frame Debugger、Unreal Insights）可以显示每个渲染 pass 的耗时、Draw Call 数量、
- Overdraw 比例等关键指标。
- 基于剖析结果，开发者可以针对性地优化瓶颈环节。

5.11.2 批处理与合批

- 批处理（Batching）是减少 Draw Call 数量的核心策略。静态批处理将不移动的网格合并为一个大网格；动态批处理对小型网格进行实时合并；
- GPU Instancing 对相同的网格和材质进行实例化渲染。在文化遗产场景中，批处理可以显著提升性能——如将古城墙的数百块砖瓦合并为少数几个 Draw Call。

5.11.3 着色器优化

- 着色器（Shader）是渲染管线的可编程部分，其复杂度直接影响 GPU 计算负载。
- 着色器优化策略包括：简化数学运算（用近似函数替代精确函数）、减少纹理采样次数、使用 LOD 着色器（远处物体使用简化着色器）、以及避免分支语句（GPU 的并行架构对分支处理效率低）。

5.11.4 内存优化

- VR/AR 应用的内存预算有限（移动 VR 通常只有 2-4GB 可用内存），内存优化与渲染优化同等重要。
- 内存优化策略包括：纹理压缩（ASTC/ETC2 格式可以将纹理内存占用减少 75%）、网格压缩（使用量化顶点坐标）、
- 资源流式加载（按需加载而非一次性加载全部资源）和对象池（复用而非销毁 / 创建对象）。

14

5.12 VR 渲染的特殊挑战

5.12.1 立体渲染

- VR 需要同时渲染左右眼两个视角的图像，渲染负载约为普通渲染的两倍。
- 立体渲染优化策略包括：单通道立体渲染（Single-Pass Stereo Rendering，一次 Draw Call 同时渲染双眼视角）、注视点渲染（Foveated Rendering，
- 中心区域高分辨率渲染，周边区域低分辨率渲染）和多分辨率渲染（Multi-Resolution Rendering，屏幕中心区域分配更多像素）。

5.12.2 抗眩晕渲染

- VR 中的眩晕感主要由帧率不足、延迟过高和运动不一致引起。
- 渲染层面的抗眩晕策略包括：维持稳定的 90fps+ 帧率、减少运动到光子延迟（ $<20\text{ms}$ ）、避免加速 / 减速的虚拟运动（改用瞬移或平滑移动）、
- 提供视觉参考框架（如在视野中添加鼻尖或虚拟驾驶舱框架）。

5.12.3 VR 舒适度评级

- VR 体验的舒适度可以通过标准化的评级系统进行评估。VR 舒适度评级考虑因素包括：运动类型（静止 / 被动运动 / 主动运动）、运动速度、加速度、视野遮挡程度和交互复杂度。
- 基于评级结果，开发者可以为不同敏感度的用户提供不同的舒适度选项。

15

5.13 渲染引擎的选择策略

5.13.1 Unity3D vs Unreal Engine

- Unity3D 和 Unreal Engine 是 VR/AR 开发的主流引擎，两者的特点比较： Unity3D 使用 C# 编程语言，学习曲线较缓，跨平台支持好（支持移动端、PC、VR 头显等），
- 资源商店丰富，适合中小型文旅项目；
- Unreal Engine 使用 C++ 和 Blueprint 可视化编程，渲染质量更高（特别是 Unreal Engine 5 的 Nanite 和 Lumen 系统），适合对视觉品质要求极高的大型项目。

5.13.2 WebXR 的选择

- WebXR 技术允许在浏览器中运行 VR/AR 体验，无需安装额外应用。WebXR 的优势是极低的使用门槛——用户只需打开浏览器即可体验。
- 劣势是渲染性能受限于浏览器和 WebGL/WebGPU 能力，视觉品质不如原生应用。WebXR 适合轻量级的文旅体验（如全景虚拟游览、简单 AR 导览），不适合高保真 VR 体验。

5.13.3 自研引擎的考量

- 极少数大型文旅项目可能考虑自研渲染引擎。自研引擎的优势是完全定制化、无授权费用、技术自主可控；劣势是开发周期长、维护成本高、生态贫乏。
- 自研引擎通常只在有特殊技术需求（如特殊的渲染算法、特殊的交互方式）且商业引擎无法满足时才考虑。

16

5.14 移动 VR 渲染的优化深度

5.14.1 移动 GPU 的特性

- 移动 GPU（如高通 Adreno、ARM Mali、Apple GPU）与桌面 GPU 在架构和性能上有显著差异。移动 GPU 的带宽有限、热设计功耗（TDP）受限于散热能力、着色器计算能力较低。
- 针对移动 GPU 的渲染优化需要特别关注带宽优化（减少纹理采样和帧缓冲读写）和功耗控制（降低 GPU 频率和电压）。

5.14.2 移动 VR 渲染管线优化

- 移动 VR 渲染管线的优化策略包括：前向渲染替代延迟渲染（减少带宽占用）、TBDR（Tile-Based Deferred Rendering）架构优化（利用移动 GPU 的分块渲染特性）、
- 多视图渲染（Multi-View Rendering，一次渲染双眼视角）和动态分辨率缩放（根据负载动态调整渲染分辨率）。

17

5.15 渲染技术的环境影响

5.15.1 渲染能耗

- VR/AR 渲染是计算密集型任务，其能耗不容忽视。高端 VR 头显的功耗约为 15-30W，PC 级 VR 渲染的 GPU 功耗可达 300-450W。云渲染方案的数据中心能耗更为可观。
- 从环境可持续性角度，渲染优化不仅是性能问题，也是能源问题——更高效的渲染意味着更低的能耗和更小的碳足迹。

5.15.2 绿色渲染策略

- 绿色渲染策略旨在在保持视觉质量的同时降低能耗：动态帧率调整（在不需要高帧率的场景降低帧率）、渲染负载自适应（根据场景复杂度动态调整渲染参数）、
- 睡眠模式优化（在用户未交互时降低渲染负载）和云端渲染的能源调度（在可再生能源充足时段进行渲染计算）。

18

5.16 渲染质量的主观评估

5.16.1 视觉质量评估方法

- 渲染质量的客观指标（分辨率、帧率、色差等）不能完全反映用户的视觉感知质量。
- 主观评估方法包括：平均意见分数（MOS，由多名评估者为渲染质量打分）、双刺激连续质量量表（DSCQS，比较原始图像和渲染图像）和成对比较法（比较两个渲染方案的质量）。
- 主观评估能够捕捉客观指标无法反映的视觉感知差异。

5.16.2 文化感知质量

- 在文化遗产场景中，渲染质量的评估还应当包括文化感知维度——渲染结果是否准确传达了文化遗产的文化特征？这一维度需要文化专家的参与，通过专家评审评估渲染结果的文化保真度。

19

5.17 渲染中的文化符号处理

5.17.1 文化符号的视觉呈现

- 文化遗产场景中包含大量具有文化象征意义的符号——如龙凤图案、八卦符号、莲花纹饰、十字架等。这些符号的渲染不仅需要视觉上的准确性，还需要尊重其文化含义。
- 例如，佛教曼陀罗的渲染应当遵循其严格的几何规则和色彩象征体系，不能随意调整比例或配色。

5.17.2 文化敏感内容的渲染处理

- 某些文化遗产内容可能涉及文化敏感性——如宗教圣物、丧葬物品、战争遗址等。
- 渲染这些内容时需要特别谨慎：避免过度逼真的呈现可能引起不适的内容、提供适当的文化背景说明、给予用户选择跳过敏感内容的选项。

5.17.3 渲染风格与文化身份

- 渲染风格本身承载文化身份的信息——水墨渲染传达中国文人文化身份，浮世绘风格传达日本文化身份，哥特式渲染传达欧洲中世纪文化身份。
- 在文化遗产场景的渲染中，选择与文化身份一致的风格可以增强文化体验的深度，但也需要避免风格化过度导致历史真实性受损。

20

5.18 渲染技术的发展趋势

5.18.1 实时全局光照的普及

- 随着硬件性能的提升和算法的优化，实时全局光照（Real-time GI）正在从高端 PC 向移动端普及。
- Unity 的 Enlighten 和 Unreal 的 Lumen 系统已经能够在 PC 端实现高质量的实时 GI，移动端的实时 GI 方案也在快速发展。
- 实时 GI 的普及将显著提升文化遗产场景的视觉品质——真实的间接光照能够传达建筑空间的氛围和材质的微妙质感。

5.18.2 程序化渲染

- 程序化渲染（Procedural Rendering）通过算法生成渲染内容而非手工制作，适合大规模场景的快速渲染。
 - 在文化遗产场景中，程序化渲染可以用于：城墙砖纹的批量生成、植被的季节变化、天气效果的动态变化等。
- 程序化渲染与手工修饰的结合可以在效率和质量之间取得平衡。

21

5.19 渲染优化与体验质量的平衡

5.19.1 质量 - 性能权衡决策

- 渲染设计中的核心决策是质量 - 性能权衡——在有限的计算资源下，如何在视觉质量和渲染性能之间取得平衡。这一权衡没有统一的最优解，需要根据项目的具体情况进行决策。
- 决策因素包括：目标设备性能（决定了性能上限）、体验类型（VR 需要更高帧率，AR 可以稍低）、内容特点（静态场景可以更多烘焙，
- 动态场景需要更多实时计算）和用户期望（高端体验用户对视觉质量要求更高）。

5.19.2 自适应渲染

- 自适应渲染技术根据运行时的性能状况动态调整渲染参数——当帧率下降时自动降低渲染分辨率、减少远处物体的 LOD 级别或关闭某些后处理效果；当性能充裕时自动提升渲染质量。
- 自适应渲染确保了在不同硬件配置上都能获得流畅的体验。

22

5.21 本章补充：渲染管线的选择决策

5.21 本章补充：渲染管线的选择决策

- 渲染管线的选择是影响项目整体技术架构的关键决策。
- Unity3D 提供三种渲染管线：内置渲染管线（ Built-in RP ，兼容性最好但功能最基础）、通用渲染管线（ URP ，性能与质量的平衡，适合移动端和 VR ）、高清渲染管线（ HDRP ，
- 最高视觉质量，适合高端 PC 项目）。
- 选择决策应基于：目标平台（移动端选 URP ，高端 PC 选 HDRP ）、视觉品质要求（文化遗产高保真展示选 HDRP ，一般导览选 URP ）和团队技术能力（ URP 学习曲线较缓， HDRP 需要更多技术投入）。
- 文化遗产数字化的伦理框架
- 数字化过程中的文化敏感性处理
- 文化遗产的 VR/AR 数字化不仅是技术过程，更是文化诠释过程。
- 不同文化群体对同一遗产的认知和情感关联可能存在显著差异，数字化方案必须尊重源社区（ Source Community ）的文化主权和解释权 [28] 。

5.21 本章补充：渲染管线选择决策

- 在非遗数字化实践中，"社区参与式设计"（Community-Based Participatory Design, CBPD）方法论强调从需求调研、内容创作到体验评估的全流程社区参与，
- 确保数字化成果不偏离文化本意。
- 文化敏感性处理的具体实践包括：对神圣或仪式性内容设置访问权限限制（如仅限特定族群或特定仪式场合可访问）、对敏感历史事件的 VR 再现进行多利益相关方审查、
- 以及对文化符号的商业化使用进行伦理评估 [29]。
- 在贵州苗族蜡染 VR 项目中，开发团队与苗族社区长老共同建立了内容审核委员会，对 VR 体验中涉及的纹样含义、染色工艺细节和仪式场景进行逐项审查，确保文化表达的准确性和尊重性 [30]。
- 数字典藏的长期保存与元数据标准
- VR/AR 文旅内容的数字典藏（Digital Preservation）是确保文化遗产数字资产长期可用性的关键环节。
- 与静态图片或视频不同，VR/AR 内容包含三维模型、交互逻辑、场景脚本和渲染配置等多层次数据，

5.21 本章补充：渲染管线选择决策

- 其长期保存面临格式兼容性和技术过时（ Technological Obsolescence ）的双重挑战 [31] 。
- 国际文化遗产数字保存领域已形成多项元数据标准： CIDOC CRM （国际博物馆协会概念参考模型）用于文化遗产本体的结构化描述、
- Europeana Data Model （ EDM ）用于跨机构数字资源的聚合检索、以及 PREMIS 用于保存行为和权利信息的记录 [32] 。
- 在 VR/AR 文旅内容保存实践中，
- 需要在标准元数据之上扩展交互行为描述（ Interaction Metadata ）和体验配置参数（ Experience Configuration Metadata ），
- 以完整记录沉浸式体验的可重现信息。
- 数字孪生与文化遗产预防性保护
- 数字孪生（ Digital Twin ）技术在文化遗产保护领域的应用正在从概念验证走向实际部署。

5.21 本章补充：渲染管线选择决策

- 文化遗产数字孪生通过高精度三维扫描、多光谱成像和环境传感器网络，建立遗产实体的实时数字镜像，为预防性保护（Preventive Conservation）提供数据支撑 [33]。
- 与传统的数字化存档不同，数字孪生强调虚实之间的实时双向映射——物理实体的状态变化实时反映在数字模型中，数字模型的分析结果也可反馈指导物理实体的保护决策。
- 在乐山大佛数字孪生项目中，研究团队部署了包含温湿度传感器、应力传感器和位移传感器在内的 200 余个监测节点，实时采集大佛本体和周边环境的状态数据 [34]。
- 数字孪生模型通过有限元分析（FEA）模拟温度变化和雨水侵蚀对大佛本体结构的长期影响，预测未来 10-50 年的风化趋势，为保护工程提供科学依据。
- VR/AR 技术使这些不可见的保护数据对游客可见——游客可通过 AR 眼镜查看大佛内部结构的实时监测数据，理解文物保护的科学过程。
- 非遗数字化的活态传承模式
- 非物质文化遗产的数字化保护面临 " 活态性 "（Livability）的核心挑战——非遗的生命力在于代际传承和活态演绎，而非静态记录 [35]。
- VR/AR 技术为非遗的活态传承提供了新的载体形式：传统工艺的 VR 教学系统可记录老艺人的完整操作流程（包括微表情、力度和节奏），使学习者获得比传统观摩更丰富的信息 [36]；

5.21 本章补充：渲染管线的选择决策

- AR 辅助传承系统可在学习者操作时实时叠加正确姿势和步骤提示，降低学习门槛。
- 在侗族大歌的 VR 数字化保护项目中，研究团队采用了 " 声场重建 + 虚拟合唱 " 的技术方案——通过多通道声场采集技术记录侗族大歌在原生鼓楼空间中的声学特征，然后在 VR 环境中重建真实声场，
- 使体验者能够感受多声部合唱的空间层次感 [37]。
- 这一方案不仅保存了非遗的音频信息，更保存了其空间声学环境这一不可分割的文化语境。
- 文化遗产数字化的知识产权保护
- VR/AR 文旅内容的知识产权保护是一个多层次法律问题。第一层是原始文化遗产的数字复制权——谁有权对文化遗产进行数字化采集和存储？
- 根据《文物保护法》相关规定，国有文物保护单位的数字化采集需经文物行政部门批准，数字化成果的权属归采集单位所有但使用权受限制 [38]。
- 第二层是数字化成果的衍生创作权——基于文化遗产数字模型开发的 VR/AR 体验产品属于衍生作品，其著作权归属需要在原始数字资产提供方和衍生内容开发方之间明确约定 [39]。

5.21 本章补充：渲染管线的选择决策

- 第三层是数字遗产的传播权——VR/AR 文旅内容通过网络跨境传播时涉及复杂的国际知识产权法律冲突。
- 联合国教科文组织 2003 年《保护非物质文化遗产公约》强调非遗数字化成果的传播应尊重源社区意愿，但这一软法性原则在各国国内法中的执行力度参差不齐 [40]。
- 在实践中，建议 VR/AR 文旅项目在启动阶段即建立清晰的知识产权矩阵，明确数字资产权属、衍生创作权和传播权的分配机制。
- 社区参与式数字化的实践模式
- 社区参与式数字化（Community-Based Digitization）强调文化遗产数字化过程中源社区的全程参与和决策权。
- 这一方法论源于 " 社区考古学 "（Community Archaeology）和 " 参与式博物馆 "（Participatory Museum）理论，
- 将文化遗产的数字化从 " 专家主导的外部采集 " 转变为 " 社区主导的内生表达 "[41]。
- 在实践中，社区参与式数字化包含五个关键步骤：社区需求调研（了解社区对数字化的期望和顾虑）、社区能力建设（培训社区成员参与数字采集和内容创作）、

5.21 本章补充：渲染管线选择决策

- 协同内容设计（社区与开发团队共同决定数字化内容和呈现方式）、社区审核反馈（社区对数字化成果进行审核和修改）和社区利益分享（数字化产生的经济收益与社区共享） [42]。
- 在云南哈尼梯田 VR 项目中，哈尼族社区成员参与了从梯田文化叙事脚本编写到 VR 体验场景设计的全过程，项目收益的 15% 返还给社区用于梯田保护基金 [43]。
- 参考文献
- [1] Li C, Li S, Zhao Y, et al. RT-NeRF: Real-time on-device neural radiance fields towards immersive AR/VR rendering[J]. arXiv preprint, 2025, arXiv:2212.01120.
- [2] Ryu J, Kwon H, Park W, et al. A low-power neural graphics system for instant 3D modeling and real-time rendering on mobile AR/VR devices[C]. IEEE COOLCHIPS, 2024: 1-3.
- [3] Tovar E, Pacheco F. A survey of techniques and technologies for web-based real-time interaction

5.21 本章补充：渲染管线的选择决策

- tive rendering[J]. Computer Standards & Interfaces, 2001, 23(5): 353-363.
- [4] Levante R. Data management and virtual reality applications of BIM models[D]. Politecnico di Milano, 2018.
- [5] Tian W, Zhao Y. Optimized cloud resource management and scheduling: theories and practices[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [6] Naemura T, Tago J, Harashima H. Real-time video-based modeling and rendering of 3D scenes[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(2): 66-73.
- [7] Hansson H, Altenbernd P, Pacheco F, et al. A framework for realistic real-time walkthroughs

5.21 本章补充：渲染管线的选择决策

- in a VR distributed environment[J]. Journal of WSCG, 2001, 9(1): 1-8.
- [8] Petit B, Lesage J D, Ménier C, et al. Multicamera real-time 3D modeling for telepresence and remote collaboration[J]. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, 2010, 2010 : 247108.
- [9] Li Y C, Liew A W C, Su W P. The digital museum: challenges and solution[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering, 2012, 4(3): 371-375.
- [10] Günay S. Virtual reality for lost architectural heritage visualization utilizing limited data[J]. ISPRS Archives, 2022, XLVI-2/W1: 253-258.

5.21 本章补充：渲染管线选择决策

- [11] 刘月林, 宋立巍. 基于情境叙事的非物质文化遗产交互展陈体验设计 [J]. 包装工程, 2018, 39(6): 112-117.
- [12] 李婷婷, 王相海. 基于 AR-VR 混合技术的博物馆展览互动应用研究 [J]. 现代电子技术, 2016, 39(20): 61-64.

- 本章系统介绍了实时渲染与可视化技术的原理和方法，从渲染管线基础到优化策略，从 NeRF 神经渲染到移动端低功耗方案，从色彩管理到 VR 特殊挑战。
- 这些技术直接支撑 I.M.M.E.R.S.E. 框架中的 " 实时渲染 "（R）维度，是沉浸感生成的技术基础。
- 渲染技术的本质是 " 将文化数字资产转化为可感知的视觉体验 "——再高精度的三维模型，如果没有高质量的渲染呈现，也无法产生沉浸感。
- 渲染技术不仅关注 " 如何画得逼真 "，更关注 " 如何在有限资源下画得足够好 "——这种工程化的思维是沉浸式文旅技术设计的核心特质。

- 1. 简述开篇的核心内容。
- 2. 结合贵州 / 安顺文旅实际，举例说明本章知识的应用。
- 3. 小组讨论：本章内容对旅游管理专业学习的启示。

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