

让石窟“走”下崖壁

一场十万张照片铺就的时空接力

■本报记者 俞越 实习生 江宜笑



扫一扫，了解
石窟如何“走出”崖壁

当敦煌莫高窟、云冈石窟、龙门石窟、麦积山石窟等文化瑰宝在良渚“相聚”，一批原本深藏于崖壁山间的文化遗产，正通过数字技术走进公众视野。在良渚典藏馆展出的“致广大而尽精微——石窟寺数字化成果特展”，已吸引数万名观众前来观展。而这些跨越时空的相遇背后，是浙江大学文化遗产研究院二十余年来持续不断的探索与实践。

近日，《美术报》专访浙江大学文化遗产研究院副教授刁常宇，听他讲述文化遗产数字化背后的技术探索与人文思考。

十万张照片背后： 为文化遗产留下数字记忆

如果给一座石窟建立一份“数字档案”，需要做些什么？

一次大型石窟数字化采集，往往需要拍摄超过十万张照片；为了消除阴影，工作人员要在石窟内部反复调整灯光；为了获得完整数据，工程师需要搭建多层脚手架，在狭小空间中完成不同角度的拍摄与扫描。采集结束后，海量数据还需要经过复杂计算，最终生成高精度三维模型。

“我们一直希望把照相机变成颜色测量仪器。”采访中，刁常宇反复提到“真实记录”这一关键词。以古代壁画、彩塑等文物为例，数字化采集不仅要记录其形态信息，更要尽可能准确地保留文物的色彩状态。然而，看似简单的颜色背后，涉及光学理论、材料特性以及复杂的色彩管理体系。

如果说色彩还原考验的是精度，那么大型文物的三维重建考验的则是规模。一个中大型石窟项目往往需要拍摄五万至十万张照片。石窟内部结构复杂，佛像、藻井和建筑构件彼此遮挡，任何一个角度的遗漏，都可能导致数字模型出现缺失。

而真正的挑战往往发生在采集之后。海量照片和扫描数据需要完成匹配、拼接与融合，不同设备之间的数据统一、多源数据自动匹配等问题，至今仍是行业持续攻关的技术难题。作为高校科研团队，浙江大学文化遗产研究院并不满足于完成单个项目，而是在一次次实践中持续测试设备性能、优化工作流程，希望为文化遗产数字化领域探索可复制、可推广的解决方案。

AI打印不出岁月： 技术背后的工匠精神

当一座石窟被完整记录下来之后，一个新的问题随之出现：如何让这些珍贵的文化遗产走出遗址现场，与更多观众相遇？

云冈石窟第12窟复制工程，是刁常宇印象最深刻的项目之一。作为国内最早利用3D打印技术开展大型不可移动文物复制和巡回展览的探索项目，团队一路“摸着石头过河”。从材料强度、运输变形，到表面质感还原、大型空间的精准装配，许多问题在方案设计阶段看似简单，真正实施起来却接连冒出来，只能在实践中不断试错、反复调整。

其中，最典型的一块“硬骨头”是安装。为了运输和展示需要，整座石窟被拆

分成大量模块，而重新组装时，每个模块之间的误差必须控制在毫米级范围内。

但经过反复推演，他们发现，先安装顶部模块，再逐层向下拼接，能够将误差逐步释放，最终实现整体空间的精准还原。如今，这座体量庞大的复制石窟，15个工作日左右便可完成整体安装。曾经困扰团队许久的难题，也最终变成了一套成熟的技术方案。

然而，比安装更难，的是如何让复制品拥有真实文物的“生命感”。复制件打印完成后，真正的考验才刚刚开始。工作人员拿着喷枪和颜料，围着巨大的石窟模型反复打磨细节。岩石肌理、风化颗粒、贴金脱落后的斑驳痕迹，都需要靠人工一点点“手搓”出来。即便今天的设备已经能够直接输出彩色模型，团队依然坚持人工上色。因为机器能够复制颜色，却复制不了岁月；算法能够生成图像，却替代不了工匠对历史质感的把握。

在追求高度逼真复制效果的过程中，真正发挥关键作用的，依然是人的经验与工匠精神。

当技术遇见观众： 一场关于文化遗产的“双向奔赴”

近年来，浙江大学文化遗产研究院持续探索数字导览、AI讲解以及沉浸式VR体验项目。从2020年在浙江大学艺术与考古博物馆举办的“魏风堂堂：云冈石窟的百年记忆和再现”特展，到2021年的“无界之境——佛光寺建筑、彩塑、壁画数字化成果展”，再到2025年良渚典藏馆的“致广大而尽精微——石窟寺数字化成果特展”，一批原本难以移动、难以抵达的文化遗产，正通过数字技术跨越地域限制，与公众见面。

技术让石窟“走”下崖壁，也让观众有机会以新的方式走近文化遗产。但让刁常宇印象深刻的，并不只是展览现场的赞叹声，还有来自观众的意见与建议。

在一次石窟复制展览中，一位观众提出疑问：“佛像为什么摆得这么低？”原来，为了方便观众观察细节，团队适当降低了部分造像的展示高度。但在这位观众看来，这样的调整削弱了原有石窟空间的庄严感。

如何在观展体验与历史真实性之间寻找平衡？如何既让观众走近文物，又让文物保持原有文化语境？这些问题没有标准答案，却成为团队不断探索优化展览呈现的重要动力。

文化遗产传播从来不是单向输出。数字技术让文物走向公众，而公众也在用自己的观察和思考反过来影响展览、推动改进。这种互动与回应，正是一场关于文化遗产的“双向奔赴”。

让文化遗产走进年轻人的世界

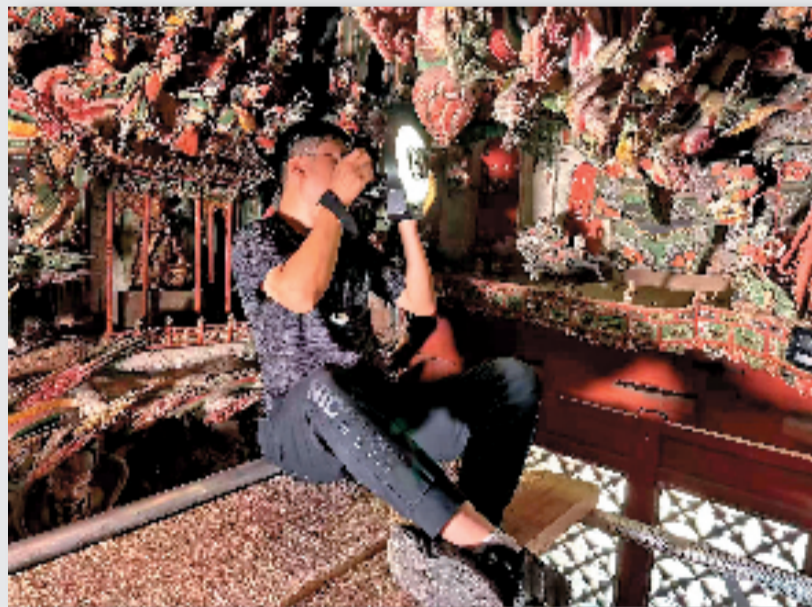
这些年，研究院围绕石窟复制展览开展了大量面向青少年的美育活动。在展览现场，写生、研学、传统文化体验等活动经常同步进行。相比于单纯观看展品，孩子们更愿意用自己的方式参与其中。



2022年3月“盛世修典——中国历代绘画大系成果展(浙江美术馆站)”展厅现场



云冈石窟第12窟复制窟安装现场



山西长治观音堂悬塑的数字化采集现场

文化传承不是一句口号，而是一次次真实的接触与体验。“一次好的展览体验，甚至有可能改变一个孩子未来的人生方向。”

除了展览教育，研究院也在尝试通过数字技术创造新的文化体验方式。团队开发的“佛光朗照”多人协同VR项目，让观众以6到8人为一组，跟随营造学社当年的考察路线，在虚拟空间中重新发现佛光寺。借助高精度数字化成果，观众甚至能够“登上”东大殿屋顶，近距离观察现实中

难以抵达的梁架结构。

而支撑这一沉浸式体验的，是长达三年的数字化采集工作。团队首次完成了佛光寺东大殿的完整高精度数字记录，并将这些珍贵数据转化为公众触手可及的数字体验。

技术不断更新迭代，让文物突破了时间与空间的限制；但文化遗产保护的意义，从来不只是保存过去，更是让更多人看见它、理解它、热爱它，并将这份珍贵的文化记忆继续传递下去。