

7月22日,在陕西西安举行的世界互联网大会数字丝路发展论坛上,“数智时代的文化遗产保护与传承”分论坛聚焦丝路遗存与文明对话,《世界互联网大会文化遗产数字化案例征集(2026)》同时发布。

文化遗产数字化案例征集活动由世界互联网大会主办、中国文物报社组织实施,从近200项实践中精选出13个国家及地区的45项优秀案例,涵盖保护、考古、展示利用各领域,集中呈现了全球文化遗产数字化在数据驱动、技术融合、跨界协作、传播创新等方面的最新探索。本报陆续刊登入围案例,为数智时代的文化遗产保护与传承提供交流平台。

数据聚合 华光再现

——龙门石窟残损及流散文物数据聚合3D打印巡展创新实践

龙门石窟研究院

龙门石窟位于国家历史文化名城、十三朝古都洛阳,是世界现存5世纪至10世纪最杰出的石刻艺术宝库之一。自5世纪末开凿以来,经北魏、东西魏、北齐、隋、唐等朝代接续营造,最终形成了2345个编号窟龕、近11万尊造像、2800余处碑刻题记、近80座佛塔的超大型石窟石刻遗迹群落,是中外文明交流互鉴的结晶和中华民族共同体形成发展的历史见证。1961年公布为首批全国重点文物保护单位,2000年列入《世界遗产名录》。联合国教科文组织世界遗产委员会认为,龙门石窟代表了“中国石刻艺术的最高峰”。清末民初,国力衰微,龙门石窟遭受大规模盗凿破坏,大量精美造像流散海内外。据龙门石窟研究院多年调查统计,现有近10个国家40余家博物馆及私人藏家收藏有龙门造像。上述统计仅为已知情况,远不能涵盖被盗流失的全部文物。依托数字化技术实现流散文物的数字复位和活化利用,成为新时代龙门石窟保护研究的重要课题。

龙门石窟残损及流散文物的数据聚合和展示利用面临的核心难点:部分文物被盗凿过程中,因野蛮施力遭到损毁,劫掠者中途放弃,留下无法弥补的永久性缺憾;大量精美文物在20世纪被盗凿流落海外,实物回归难度大;复位匹配技术难度高,龙门石窟岩体为石灰岩,盗凿位置多有岩石碎块脱落,部分浅浮雕更是被凿为碎片外运,残损形态复杂。仅凭照片、经验比对的传统判定方式误差大,说服力弱,必须反复实地勘比残迹尺寸与细节,工作量巨大,判定准确度不足。

构建全链条数字技术体系,实现流散文物科学复位

流散文物数字复位绝非简单数据拼合,而是一套严谨、标准化、可复现的文物科研体系。龙门石窟研究院搭建高精度数字化采集、点云原位配准、高保真数字模型重建、高精度3D打印实体复原四大闭环技术链条,全程非接触作业,最大程度保护文物安全,同时实现毫米级精准匹配,彻底改变传统经验判定模式。亚毫米级高精度数字化采集,留存文物微观几何形态。数据采集采用高精度关节臂式激光扫描仪,一方面对石窟本体盗凿痕迹进行扫描;另一方面对流散文物数据进行采集和建档。数据采集采用非接触式方式,不会对石刻表面造成磨损,扫描精度可达亚毫米,对残迹断面、盗凿的边缘轮廓、风化痕迹等



高精度数字化采集

微观细节完整记录,形成高精度三维点云数据,为算法的精准匹配提供完整、客观的依据。

采用Open3D点云算法进行配准,用量化数据锁定文物原位。原位匹配是整个项目最核心的技术创新,引入基于Open3D的点云算法,依靠ICP迭代最近点算法精细校准,让残件与窟龕断面严丝合缝;设置距离阈值,自动计算两组模型点云配对成功率,点对距离均方差两项核心量化指标,数值直观反映匹配契合度。这套算法从根本上解决了流散文物原位靠主观判定的痛点,让造像残件原位研究从经验判断走向数据实证。

数字模型重建,虚拟重塑石窟完整造像。完成精准配准后,技术人员将两组点云数据融合,最终生成“身首合一”的完整数字模型。目前,古阳洞高树龕主尊、火顶洞北壁菩萨等多组造像均完成数字合璧。在数字空间中,缺首、断臂的石刻重新恢复北魏、盛唐造像的庄严气韵,千年前石窟开凿完成时的完整样貌得以重现。

SLA光敏树脂3D打印,实体复刻实现可触摸展示。数字模型最终要落地于公众展示,项目采用高精度SLA激光固化3D打印技术,选用光敏树脂材料,打印精度控制在0.05毫米至0.1毫米,完整复刻虚拟修复文物的形态、肌理。修复成果不再局限于电脑屏幕,实体复原科研成果转化为展品,走进展厅、面向游客,参观者可近距离感受石窟艺术的魅力。

从“云上共享”到“活化传播”

——浙江美术馆激活艺术典藏数字生命力

白力民 杨鉴

以往,策展人如果要筹办一场大型艺术展,需要少则数周,多则数月,耗时费力。

如今,在浙江,策展人只需要登录“藏品云”网页或手机端APP,输入关键词,批量筛选符合条件的作品,一键生成借展清单,提交线上审批。出借方确认后,藏品出库自动记录。整个流程,从过去的数周压缩到一天甚至几个小时。

这背后,是浙江美术馆历时七年搭建的一套艺术典藏数字共享与活化传播应用体系。

破局痛点:从“跑库房”到“跑数据”

“藏品云”的诞生,源于一个现实困境。

7年前,浙江美术馆启动“藏品云”项目建设时,美术馆行业面临着几个“老大难”问题:家底不清、工具落后、各自为政、大门紧闭。

“家底不清”,是指不少美术馆尚未完成藏品的全面清查和数字化登记,到底有多少件藏品、什么门类、什么状况,说不清楚;“工具落后”,是指不少场馆仍靠手工表格登录、翻账本查询,即便开发了管理软件,也往往功能单一、标准各异;“各自为政”,是指各馆系统互不兼容,藏品信息无法流通,处于“数据孤岛”状态,跨区域借展协调成本高;“大门紧闭”,是大多数藏品资源未向社会开放,公众想了解某件艺术作品,几乎无从下手。

这些问题叠加在一起,造成一个尴尬的局面:大馆有藏品但利用率不高,基层馆想办展却无米下锅,公众有需求却触不可及。

如何破局?浙江美术馆给出的答案是:让“跑数据”代替“跑库房”,让“电子账”代替“手工账”。

秉持开放、合作、互惠、共享、协同的原则,浙江美术馆利用移动互联、云计算、大数据、虚拟现实、人工智能等数字技术,逐步搭建起“藏品云”应用体系,具体包括美术藏品数字资源共享平台“典藏大脑”、美术馆藏品数字资源监测应用“数字驾驶舱”、艺术藏品全民共享小程序“悦藏”,集艺术典藏资源数字化采集、录入、聚合、管理、查询、借还、共享、利用、传播等功能于一体。

实践探索:三大模块既能“管好”也能“用好”

据浙江美术馆典藏部负责人介绍,“藏品云”由三个核心模块构成,分别面向不同用户。第一个是“典藏大脑”,即美术藏品数字资源共

享平台,是这套应用体系的核心,面向美术馆、名人馆、纪念馆等相关场馆的从业人员。各馆按照国家统一标准将采集的藏品数字信息上传入驻,从业者可以在平台上检索、遴选,发起借展申请,登记出入库,实现跨区域藏品数字资源的共享互补。这个模块解决的核心问题是“找得到、借得动”,过去馆际借展靠人脉、靠电话,现在靠数据、靠流程。

第二个是“数字驾驶舱”,即藏品数字资源监测应用,是管理者的“决策顾问”,面向文化管理部门。一个地区有多少件藏品、什么门类、什么等级、分布在哪些馆,打开屏幕一目了然。这为管理部门掌握家底、制定政策提供了数据支撑,也解决了过去“报上来的数对不对、全不全”的疑虑。这一应用实现了对藏品资源的全流程监测和“一张图”管理,也为美术馆的展览策划、学术研究和文创开发等工作提供了便利。

第三个是“悦藏”小程序,是普通公众的“掌上美术馆”。用户打开微信小程序,就可以检索查看入驻机构的藏品、浏览“云展览”和“云画册”,也可以把喜欢的作品转发分享给好友,实现“足不出户,佳作尽在指尖”。

在终端形态上,“藏品云”采用“小屏+大屏”多终端融合服务模式。小屏是手机APP和微信小程序,大屏则包括面向观众的触控一体机和面向管理部门的数据展示屏。目前,浙江全省已有社区、医院、高校等近百家单位部署触控一体机,打通了艺术通向群众的“最后一公里”,只需触摸屏幕,艺术资源便能“飞入寻常百姓家”。

多维创新:从技术、模式到治理的突破

“藏品云”的创新,不仅体现在技术层面,更体现在管理模式和行业治理等多个维度。

在技术创新上,浙江美术馆整合利用移动互联、云计算、大数据等信息技术,研发“藏品云”及其应用服务;利用虚拟现实、混合现实、人工智能等新兴技术,研发“云策展”“云导览”等互动场景应用,让“藏”在库房里的艺术品“活”起来,帮助公众了解藏品背后的故事。

在模式创新上,平台秉持开放共享理念,在满足美术馆等专业机构使用需求的基础上,采用柔性化、模块化的技术架构,预留了可拓展、可接入的数据共享和应用场景接口,便于不断完善服务功能,扩大应用范围,打破了传统的“数据孤岛”管理模式,有利于

多维创新,赋能龙门石窟文物数字化活化传播

依托数字技术,构建流散文物复原全新体系。创新构建流散文物数字复位完整技术体系,通过基于Open3D的点云精准配准算法,实现流散造像与洞窟原址的高精度匹配还原。借助SLA高精度3D打印技术,将原本分散收藏、远离故土的流散文物以数字复原形式重回公众视野,让虚拟修复的石刻造像走出岩壁,走进展厅。

创新展陈形式,丰富文化叙事表达维度。流散文物数字复位展示采用“时间轴+世界地图+新旧照片对比”的立体化叙事模式,以时间轴梳理清末民初海内外学者石窟考察史实,以新旧影像对比直观呈现石窟沧桑变迁,以世界地图可视化展示流散文物全球分布,极大增强历史叙事的真实性与代入感。展览集中亮相研究院近年数字复位、虚拟修复成果,集中呈现龙门石窟精湛的石刻艺术底蕴与深厚的历史文化价值。

搭建融媒矩阵,拓宽文化传播辐射路径。构建传统媒体与新媒体融合的立体化传播矩阵,联动主流媒体深度报道,依托抖音、视频号等新媒体平台广泛传播。设置多处二维码交互端口,观众可随时拓展查阅石窟百年光影、流散文物资料、专题纪录片等海量资源,实现线下观展、线上延续的延伸式体验。

科研成果转化为专题巡展,为流散文物保护利用提供参考

工作模式上融合贯通。龙门石窟残损及流散文物数据聚合3D打印巡展形成了“技术赋能+文化叙事+跨界协作”的可复制路径。在技术上构建起“三维扫描—数据聚合—3D打印—交互展示”全流程体系,其点云配准算法、虚拟复原技术途径等可直接应用于其他石窟寺及残损、流散文物保护。

协作机制上联合发力。联动科研院所、高校、博物馆、新闻媒体等机构,共同推进石窟寺文物保护利用工作,形成了“场景需求—学术支撑—展陈落地—教育传播”闭环,验证了跨机构合作的有效性,为文化遗产跨机构合作提供范本,同时免费开放与多媒体互动结合的方式,为文物数字化展览的公众传播提供参考。

展览主题上因地制宜。以“主题统一+在地化表达”平衡了巡展一致性与地方特色,如在洛阳的专题展突出“数据成果的展示”,在无锡灵山博物馆的展览侧重“艺术对话”、与南京栖霞山石窟研究院联合举办的展览聚焦呈现“南北石窟艺术的对比研究”。

该系列巡展获60余家媒体报道,线上传播累计曝光量超5000万次。其中的龙门石窟宾阳中洞藻井彩绘复原动画在海内外广泛传播,反响热烈。全球化传播了龙门石窟典型窟龕、精美纹饰、乐舞及彩绘的数字化保护研究综合成果,对扩大中华文化国际影响力具有重要意义。



数字驾驶舱视图

融入整个公共文化服务的数字生态。

在治理创新上,浙江美术馆同步制定了《美术馆藏品数字资源采集、存储和利用指导手册》《美术馆藏品数字资源共享平台使用规范》等操作文件,在采集精度、存储格式、著录规范、共享权限、版权保护等方面作出了明确规定,解决了“怎么用、边界在哪”的问题。值得关注的是,浙江美术馆在此基础上还制定了省级地方标准《公共美术馆数字化服务和管理规范》,经检验完善后,将其转化为全国首部行业标准,为美术馆行业数字化转型提供参考。

建设成效:从“浙江模式”到“省际共享”

“藏品云”的成效,已从浙江辐射到全国。

截至目前,浙江、陕西、新疆、四川、青海、贵州、湖南、安徽、江西9个省份的52家美术馆入驻平台,4万余件艺术藏品实现“云上见”,使“浙江模式”的领跑优势转化为普惠全国的“共享红利”,特别是有效缓解了基层美术馆的借展难题,有力推进美术馆“共同体”建设。去年,该项目入选文化和旅游部“文化和旅游数字化创新示范十佳案例”,系全国美术馆界唯一入选案例。

“藏品云”最直观的成效体现在展览上。得益于艺术资源互联互通,入驻的美术馆已成功举办“天山抒怀”“走进西藏”“南山盈藏”等80余场主题展览,其中10多项获得“全国美术馆馆藏精品展出季”“全国美术馆优秀展览项目”,广受社会好评。

近年来,入驻平台的美术馆开展了“流动美术馆”“美育村”等美育项目,让基层群众在家门口就能享受更多更好的精神文化生活,累计服务乡镇、社区群众530余人次,“小角见大师”等多个项目获评“全国美术馆优秀公教项目”。

未来,浙江美术馆将进一步推进“藏品云”建设,继续扩大入驻范围,争取覆盖更多省份和场馆,特别是藏品丰富的省级馆和国家重点美术馆;在人工智能辅助策展、虚拟现实观展等方面做更多探索;继续完善制度体系,在版权保护与开放共享之间寻找更精细的平衡,让中华优秀传统文化在数字时代迸发出蓬勃的生命力。

(作者单位:浙江美术馆)

让数据服务于保护决策

——佛光寺后山区砖塔全过程数字化保护实践

吕宁

砖石是我国传统建筑建造的常见主材料之一,面对长期暴露于自然环境中的砖石类遗产,如何准确把握保存状态、识别主要风险,并建立科学有效的保护决策机制,是当前文物保护领域的重要课题。近年来,三维扫描等数字技术快速发展,为文化遗产精细化保护提供了新的技术支撑。但数字化工作的价值并不止于建立更加精细的数字档案,更重要的是如何将数据转化为保护认知,并服务于保护方案制定和实施过程。

佛光寺后山区砖塔保护修缮项目以山西五台佛光寺后山区三座砖塔为对象,探索建立基于多源数据融合和全过程反馈的数字化保护模式,实现从遗产记录、病害诊断到修缮实施和效果评价的全过程支撑,体现了数字技术在传统建筑保护实践中的应用价值。

项目建设:建立全过程保护的数字化工作体系

佛光寺作为我国重要文化遗产,保存有唐代木构建筑东大殿等珍贵遗存,被誉为“国内古建筑之第一瑰宝”(梁思成)。然而,既有研究与保护实践长期聚焦于唐代木构东大殿,对寺内另一重要遗存类型——砖塔的关注明显不足。事实上,佛光寺现存北齐至宋金时期的砖塔群,是研究我国早期砖塔营建技术、建筑形制演变及寺院发展格局的重要实物证据,与东大殿共同构成其突出普遍价值的重要组成部分。

由于砖塔长期处于自然环境中,受到降雨、温湿度变化、生物侵扰以及材料自身老化等因素影响,塔体表面存在砖材风化、灰缝损失、盐类沉积、植被生长等多种病害。同时,砖石结构长期变形具有渐进性和隐蔽性,传统依靠现场勘查和经验判断的方式,难以全面揭示病害发展规律,也难以科学评价修缮措施的长期效果。针对上述问题,2020年,清华大学建筑学院国家遗产中心联合清源(北京)文化遗产保护发展中心有限公司开展佛光寺后山区砖塔勘查保护修缮工作,在国家文物局和山西省文物局的指导、山西省古建筑与彩塑壁画保护研究院等单位支持下,团队围绕三座代表性砖塔——大德方便和尚塔、无垢净光塔和覆钵形无名墓塔,构建全过程数字化保护技术路线。

在勘查研究、修缮决策、施工深化和施工实施整个过程中,项目构建了“多源感知—数据融合—数字孪生—智能分析—决策支持”的整体框架,推动传统依赖经验判断的文物修缮模式向数据支撑、动态反馈和全过程管理转型。在勘查阶段,通过多时相三维扫描、现场测绘、材料检测和环境监测等方式,形成多层次、多维度的数据采集体系;同时将空间形态、材料性能和环境因素进行综合关联,识别影响砖塔长期保存的主要风险和威胁;在修缮阶段,根据勘查结果确定并随时调整干预措施,最后通过施工过程记录和竣工评价实现保护效果反馈。

数字化创新:从遗产数字记录到保护决策支持

在数字勘查已经成为文化遗产保护中常用技术手段的今天,本项目的创新性在于:不仅仅局限于某种单一技术的应用,而是融合多源数据、贯穿工程全过程,使数字成果真正服务于保护决策。

多时相三维调查,实现遗产状态精准记录。砖塔形态变化往往具有长期性和隐蔽性,仅依靠单次测量难以判断其发展趋势。项目开展多阶段三维数据采,形成覆盖修缮前、施工阶段和竣工后的连续空间记录。通过高精度点云数据分析,研究人员能够对塔体整体形态、局部变形和倾斜状态进行量化比较。例如,覆钵形无名塔塔体虽然存在约2度至3度的倾斜现象,但通过不同时间节点数据对比,未发现倾斜持续加剧趋势。这一结果为保护方案选择“现状修整”而非“重点修复”为主要策略提供了更加科学的依据,更好地践行了最小干预原则。

多学科数据融合,支撑病害机制分析。项目结合三维扫描、材料分析和环境监测,对砖材、灰浆、土体、盐类沉积物及生物侵扰等因素进行综合研究。三维扫描解决了文物几何状态的精确表达问题,材料分析揭示了病害形成与材料适配机制,稳定性分析回应了是否需要整体干预的关键判断,环境监测则补足了病害长期演化的背景信息,而人工经验判断作为综合研判的重要组成部分嵌入整个技术链条。多源信息的结合,使保护

团队能够从现象判断进一步转向机制分析,明确水分迁移、材料老化和环境作用等因素在砖塔劣化过程中的影响。由此,文物状态被转化为可量化、可比较、可论证的综合认知体系。

构建全过程数字化反馈机制,推动保护决策闭环。本项目将数字化真正用于“勘查—分析—施工—评估”全过程:前期用于建立文物状态基线,中期用于跟踪实施效果并辅助决策调整,后期用于竣工比对与保护成效评估。这样的全过程管理方式具有以下优势:能够持续监测工程前后与施工过程中的变化,及时发现并调整决策;能够有效保存各阶段数据,为后续维护、复查和长期监测提供依据;能够在工程之外反哺学术研究,使修缮工作同时成为文物本体研究和病害机制研究的知识生产过程。在此基础上,项目提出并实践了“数字化先行、全过程管理”的方法体系,将多源数据整合、动态监测与决策支持有机结合,初步构建了面向数字孪生的技术框架,实现文物状态的阶段性动态表达与数据驱动决策。

落地成效:以最小干预实现风险控制与长期保存

项目实施过程中,坚持以遗产价值和保存状态为依据,避免简单追求形制恢复或过度干预,而是重点控制影响砖塔长期保存的主动风险因素。

针对勘查发现的问题,项目采取了以现状修整为主要思路的修缮方案,具体措施包括排水组织、防水处理、植被清理、局部补刹和拆砌、灰浆补强等。在这个过程中,数字化技术持续服务于决策,使工程由静态方案执行转变为动态调整过程。项目通过数字化跟踪记录和人工现场跟踪,在施工推进中不断修正判断。例如在大德方便禅师塔塔刹修缮过程中,初期方案以覆土保护和防水处理为主,但随着施工展开及连续三维扫描数据的积累,对塔刹结构与形制的认识不断深化,最终调整为以砖材归安为基础,并在局部实现形制复原。这一过程体现了数据驱动下“认知深化—决策优化”的机制,有效避免了传统模式中一次性决策难以修正的问题。

2025年,项目完成竣工验收。竣工后的跟踪扫描和检测表明,相关措施有效控制了表层劣化和水分相关病害发展,保持了塔体整体稳定状态。与此同时,项目形成的数字档案和分析成果,为未来持续监测、维护管理和进一步研究提供了基础。

从实践效果看,本项目探索了一种适用于山地环境砖石遗产的保护路径:通过连续数据获取和综合分析,识别主要风险,实施针对性干预,实现由“解决病害”向“控制风险”的转变。

实践经验:数字技术应用服务于文化遗产保护需求

佛光寺后山区砖塔数字化保护实践表明,数字技术在文化遗产保护中的应用,关键在于能否有效回应保护问题。项目形成了以下几点思考:

坚持问题导向,避免数字化与保护需求脱节。文化遗产数字化不能简单等同于三维建模或数据采集,而应围绕遗产保存中的关键问题选择技术路线。本项目没有将数字技术作为记录工具,而是重点服务于塔体变形判断、病害识别和修缮效果评价,实现数据向保护决策转化。

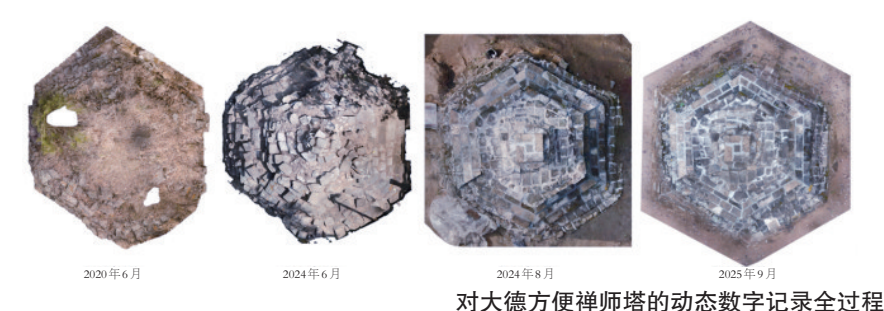
强化多学科协同,提高保护判断科学性。砖石遗产保护涉及建筑历史、结构安全、材料科学、环境影响等多个领域。数字技术提供了数据基础,但只有通过多专业协同分析,才能形成可靠的保护判断。项目通过建筑调查、三维测绘、材料检测和环境监测的结合,建立了适用于复杂遗产问题的综合分析方法。

重视全过程应用,让数字成果持续发挥作用。数字化保护不应止于项目完成,而应成为遗产长期管理的重要基础。通过建立持续更新的数据体系,数字成果能够服务于未来巡查、维护和风险评估,使文化遗产保护从阶段性工程逐步转向长期管理。

未来,该模式可结合更多类型遗产保护需求,在其他砖石建筑、石窟寺、大遗址等领域进一步推广,推动由“数据辅助分析”向“智能决策支持”转型,为文化遗产系统性保护路径和预防性保护转型提供

参考。

(作者单位:清华大学建筑学院)



对大德方便禅师塔的动态数字记录全过程