

曾侯乙尊盘三维数字化复原

江旭东

曾侯乙尊盘1978年出土于湖北随州曾侯乙墓,其玲珑剔透、巧夺天工,系湖北省博物馆十大镇馆之宝之一。春秋战国之际,随着青铜工艺中分铸法、失蜡法的发展,中国古代青铜文明迎来了第二次高峰,曾侯乙尊盘作为这一时期的杰出代表,被誉为商周青铜器的巅峰之作,是先秦时期最复杂、最精美的青铜器。

研究缘起

尊盘由尊和盘组成,尊置于盘中央,合称尊盘。尊和盘的口沿为多层镂空结构,外层无数各自独立、互不相连的蟠虺纹通过内层网状结构支撑;其腹部、底部饰有单层镂空的爬兽、圆雕的龙形附饰,其中尊体装饰28条龙、32条蟠螭,盘体装饰56条龙、48条蟠螭。

尊盘因其纷繁复杂的结构和精美绝伦的工艺,自出土以来,在工艺研究、复仿制品制作、展示利用等方面存在诸多瓶颈。在早期研究的考古报告中,仅对其工艺进行笼统描述;而后,张昌平在《关于曾侯乙尊盘》一文中对尊盘主体和附件的制作工艺、连接方式进行深入讨论,应为对曾侯乙尊盘制作工艺最详细的解读,但文章内容较为专业,普通读者难以理解。此外,对于尊盘最关键的附件——口沿多层透空附饰,传统研究手段无法穿透,仅能进行局部观察,这对以往研究者来说无异是管中窥豹,无法获取其完整结构。传统展陈方式下,观众只能观察器物外观,难以领略其内部精妙结构,更无法理解古代工匠“化繁为简”的工艺思想。以上问题,严重制约其复杂结构的研究和展示。

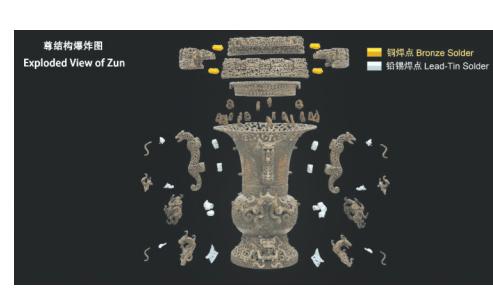
数字化技术是解决曾侯乙尊盘工艺研究、复仿制、展示利用等问题的有效途径。然而,传统的数字化技术对尊盘进行数字化信息采集时,仅能获悉其表面结构信息,难以获知其内部结构。本案利用高能射线的穿透性,获取尊盘内部结构信息。从青铜器铸造学角度对尊盘的结构进行深入研究,确定主体和附件的形态、数量和连接方式,并通过视频动画,形象生动地呈现尊盘纷繁复杂的结构。

创新实践

工业级计算机断层扫描(工业CT)利用高能X射线穿透物体,通过多角度投影数据重建三维内部结构。其核心优势在于无损检测能力,可实现复杂构件(如青铜器、精密零件)的三维



曾侯乙尊盘



尊的结构爆炸图



盘的结构爆炸图

属伪影校正等方法,将原始投影数据优化重建为三维数据模型;采用自适应滤波器等方法优化处理,优化图像质量,降低三维数据的伪影;基于灰度分布和尊盘的结构特征,去除三维数据的背景。

工艺研究:根据数据模型,基于铅锡焊点与铜焊点的密度差异,从青铜器铸造学角度,分析尊盘的主体和附件的结构、数量和连接方式。研究表明:尊由1具尊体和133只附件,19只U形锁扣,通过32处铅锡焊点、23处铜焊接连成一体;盘由1具盘体和44只附件,通过8处铸接、52处铅锡焊点、4处铜焊接连成一体。

模型拆解:根据工艺研究结果,对数据模型进行分割处理,提取尊的32处铅锡焊点和23处铜焊点,33只附件和19只U形锁扣;提取盘的44只附件,8处铸接点、52处铅锡焊点和4处铜焊点,建立98个部件的参数化拓扑关系矩阵,实现附件的动态分离与重组。

视频制作:针对分割处理后的数据模型,基于器物外形纹理和结构信息,进行表面数据高精度拟合,并渲染青铜纹理,生成整体数据模型。采用可视化形式,根据尊盘的制作工艺顺序,制作尊盘数字化拆解和重构的视频,让公众能轻松看懂这一青铜重器的复杂结构和精湛工艺。

总结展望

案例使用工业CT三维结构透视技术,首次完整呈现尊盘多层透空附饰的完整结构,并准确清晰展示其主体、附件、焊点和连接方式,深度阐释了古人的工艺思想与工匠精神,为讲好中国故事、增强中华文明传播力贡献了实质内容。

该成果以视频形式呈现,有效拉近了公众与古代科技文明的距离,将静态文物转化为动态数字内容,在提升信息丰富度与可读性的同时,实现了文物本体信息的数字化保存,使其成为可持续利用的文化资源,为CT数据在文物领域的深度应用提供了典型范例,推动了文物科技保护的创新发展。

基于尊盘三维模型,可实现一比一复原和等比例仿制,为文创研发提供核心数字资产。未来可通过开发数字艺术、交互体验等衍生内容,以创新形式传递文物价值;借助新媒体平台推动文旅融合与数字赋能,持续挖掘尊盘IP;将其融入动漫、游戏、影视等多类场景,有效促进文物资源开发利用,实现保护与创新的良性循环。

(作者单位:湖北省博物馆)

成像,精准解析内部缺陷、装配关系及材料密度分布,为文物分析、工业质检等提供科学依据。

近年来,湖北省博物馆联合故宫博物院,以工业级计算机断层扫描(工业CT)技术为核心,构建“数据采集—数据处理—学术解析—应用转化”的全链条技术框架。通过600kV微焦点工业CT系统对曾侯乙尊盘实施高穿透无损扫描,

首次获取尊盘内部结构的毫米级三维数据(精度0.1mm),在实施路径上,分五阶段推进:

数据采集:采用高穿透X射线CT技术对尊体与盘体分体扫描,通过添加滤波片等方式降低金属伪影,获取尊盘的原始三维数据模型;

数据处理:通过数据处理软件,依次对数据模型数字化处理,包括:采用射束硬化校正、金

长城全线实景三维图像覆盖范围图—截至2025年11月



“长城全线实景与三维数据库”已获取超300万张高清图像

基于数智技术的长城遗产价值挖掘与多场景阐释

张梦迪
李哲
王天莲

团队成果还受到媒体广泛关注,仅就“暗门家族”一项发现的一次新华社报道,被431家媒体引用,其中人民网一天阅读量2249万,登上微博热搜榜第29位。

三位一体:打造全场景文化阐释体验

项目团队首创“在线—在馆—在地”协同阐释模式,以长城“隐含价值”为线索、“数据”为依托,打通三大场景间的信息传递链路与阐释手段,有效融合虚拟与现实、知识与体验、保护与传播的多重边界。这一模式突破了传统线性遗产阐释局限于单一场景的桎梏,形成了多维联动、互为支撑的整体性阐释体系,依托该框架,团队已开展一系列创新实践,产出具有示范意义的长城遗产阐释方案。

“在线”场景:团队依托与腾讯合作开发的“云游长城”小程序,通过其趣味答题模块,将多年积累的长城研究成果转化为公众可参与、易理解的科普内容。小程序上线仅3天,访问量即突破200万;三个月内独立用户数达130万,累计页面访问量高达1560万次,展现出强大的传播力与公众吸引力。未来,团队计划将采集的上万公里长城影像数据整合至线上平台,打造“数字飞跃长城”的沉浸式体验,进一步拓展长城遗产的在线阐释与共享维度。

“在馆”场景:团队通过多元数字技术与创新展陈手段,将绵延上万公里的长城精华浓缩于博物馆空间,实现遗产价值的深度阐释与公众传播。具体实践中,团队运用3D打印技术将陡峭险峻的长城墙体“搬”入展厅,使观众得以在室内直观感受古代工匠卓越的建造技艺与戍边将士的艰辛;精选与长城本体同源的彩色石材制作展品,揭示长城在军事防御之外所蕴含的工艺美学与匠人精神;同时,借助增强现实(AR)技术,静态烽火台模型可在手机屏幕上动态燃起狼烟,生动还原明代“台下点烟、多烟传烽”的烽燧通信机制,让历史场景跃然眼前。

“在地”场景:基于全线长城数据采集与最新价值研究成果,团队提出“随身游”“AR历史再现”等在地的数字化阐释方案。游客在八达岭、山海关等重点景区,只需扫码即可获取专业语音讲解,并通过增强现实(AR)技术,在手机屏幕上观看历史场景与现实景观叠加的沉浸式影像,真正实现“走到哪、学到哪、看到哪”的深度游览体验。

面向未来:从长城开创数智时代遗产研究新范式

项目聚焦长城等线性遗产,融合建筑、人文与信息技术,构建文化遗产保护与传承的数智方案,依托全线实景三维数据库打通“在线—在馆—在地”多场景阐释路径,创新应用低空信息采集、人工智能统计、数据挖掘、数字传播技术,实现整体性研究与活化利用。该项目成果不仅支撑长城国家公园建设,更通过深度挖掘工程智慧与戍边文化,以多元方式向公众阐释遗产价值,助力长城成为弘扬民族精神、坚定文化自信的新时代国家文化名片。

展望未来,团队将持续开展长城动态测绘,构建可更新的“数字长城”,揭示更多隐秘遗存,并服务于长城监测需求;同步推进长城知识图谱建设,实现语义化、可推理的智能知识服务。同时,团队已将成熟技术框架拓展至蜀道遗产数字化项目,并计划推广至大运河、丝绸之路、茶马古道等线性遗产,以数智技术激活遗产价值,焕发其新时代生命力。

(作者单位:天津大学建筑学院)



长城全线低空信息采集三维模型为遗产价值挖掘和病害监测提供高精度数据



借助数智技术团队挖掘出多项长城隐含价值

数字赋能千年瓷都

——景德镇“古陶瓷基因库数字化平台”文化遗产保护实践

翁彦俊 邹媛 熊喆

景德镇御窑博物院“基于大数据的古陶瓷基因库数字化平台”是景德镇在千年陶瓷文化基础上的一次数字化创新,作为以“基因”概念系统化构建的古陶瓷数字化平台,该项目打通考古、保护、修复、展示、传播、文创等环节,为文化遗产数字化提供可复制的“中国方案”。

千年瓷都的数字化新篇章

景德镇素以“世界瓷都”闻名于世,陶瓷生产与文明进程在此交织千年。自唐代窑业兴起,经宋元明清不断发展,景德镇的御窑与民窑共同铸就了中华陶瓷艺术的辉煌。然而,随着时间流逝,散落于考古遗址与馆藏中的瓷片多达数千万件,这些珍贵的文化信息亟待系统整理与科学保存。

在国家文化数字化战略的引领下,景德镇御窑博物院率先行动,依托近40年来考古出土的约2000万件瓷片,启动“古陶瓷基因库”建设。

所谓“基因”,即通过采集古陶瓷在胎、釉、彩、纹饰、成型方法等多维数据,形成可比对、可追溯的数据信息,从而实现古陶瓷的“数字生命”再造。由此搭建的古陶瓷基因库数字化平台,不仅是陶瓷文化保护的重要基础设施,更是推动文物活化利用的核心载体。

破解痛点:从碎片化到系统化

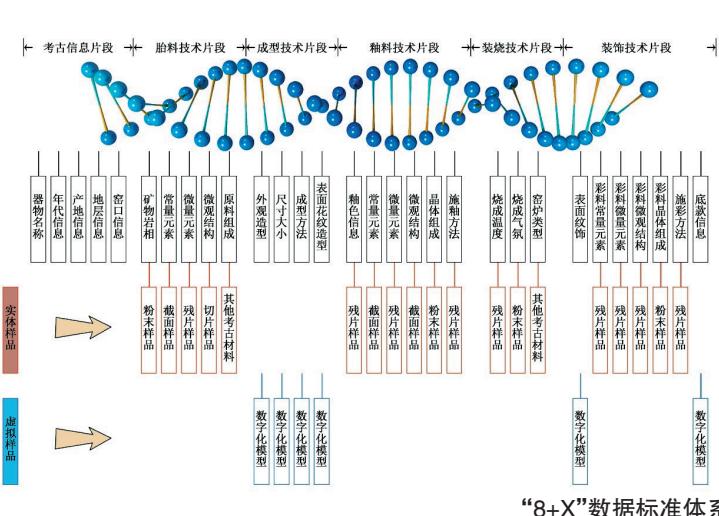
长期以来,古陶瓷研究领域面临三大痛点:一是信息碎片化严重。考古发掘、馆藏资料、文物征集之间缺乏统一标准与关联,导致研究成果难以沉淀;二是科技检测与艺术史研究脱节。缺少系统的科学表征数据支撑,使得跨学科研究难以深入;三是数字化建设起步较晚,缺乏跨机构共享机制,研究与应用难以形成合力。

古陶瓷基因库的出现,正是为了解决这些问题。通过“实物标本+基因数据库+软件系统+标准规范+应用示范”的体系化建设,该项目实现了古陶瓷数据的精准采集、深度挖掘与多元利用,推动文物研究与保护走向系统化、智能化的新阶段。

技术突破:数字化赋能文物保护

古陶瓷基因库数字化平台构建了由基础设施层、应用支撑层和应用层组成的三层技术架构,全面覆盖数据采集、管理与应用;

在采集端,利用柔性制样机器人、三维建模和语义解构技术,构建高精度数字化样本库;在管理端,通过“自动识别—专家复核—标准输出”的闭环机制,保证数据的科学性与可靠性;在应用端,打造科研数据库、公众资源库和知识图谱交互展示平台,实现学术研究与公众共享双轮驱动。特别是项目提出的“古陶瓷基因”概念,在全



“8+X”数据标准体系

精品展上,景德镇御窑博物院重点展示了基因库在“古陶瓷纹饰与色彩提取”方面的成果。现场设置了热转印互动体验,观众可根据数据库中提取的纹饰元素,现场设计定制文创T恤。这一跨界互动不仅受到广泛欢迎,更直观展现了文化遗产数字资源的活化利用。

构建全球共享的陶瓷知识体系

面向未来,古陶瓷基因库将继续在标准建设、智能化应用、跨界拓展和国际合作等方面发力。项目将进一步细化胎料、釉料、彩料与纹饰等科学表征指标,推动陶瓷研究的国际标准化进程;同时借助人工智能技术,实现纹饰与造型的自动识别与比对,提升文物研究与修复的效率与精度。在应用层面,基因库将继续拓展至考古研究、修复指导、展览展示、文创设计等多元场景,让数据成果更广泛地服务于文物保护与社会公众。依托“国际瓷器研究联盟”,景德镇还将深化与世界各地文博机构和科研院所的合作,推动资源的共建共享,构建覆盖广度与深度兼备的陶瓷知识体系,形成可推广的“中国经验”,为全球文化遗产保护与文明交流贡献更多智慧。

从考古发掘现场的碎片,到数据库中的数字基因,再到公众手中的文创产品,景德镇“古陶瓷基因库数字化平台”让沉睡千年的文明重新焕发生命力。它不仅为中国文化遗产保护提供了系统化、可推广的新路径,也展示了科技赋能文化的无限可能。

古老的陶瓷纹饰通过数字化方式跃然眼前,当千年前的工艺通过人工智能再度复现,文化遗产不仅得到了保护,更真正“活”在了当下。千年瓷都,正以数字化的力量续写辉煌。

(作者单位:景德镇御窑博物院)



在2025年世界互联网大会文化遗产数字化精品展