

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 条蟠虺，盘体装饰 56 条龙、48 条蟠虺。

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、复制制品制作、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，普通读者较难理解。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。

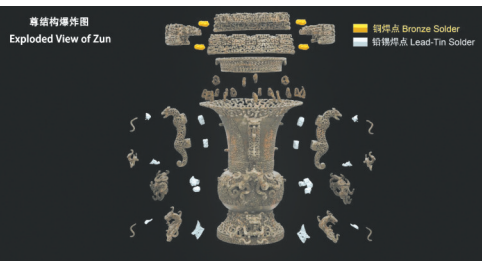
数字化技术是解决曾侯乙尊盘工艺研究、复制制、展示利用等问题的有效途径。然而，传统的数字化技术对尊盘进行数字化信息采集时，仅能获取其表面结构信息，难以获知其内部结构。本案利用高能射线的穿透性，获取尊盘内部结构信息。从青铜器铸造学角度对尊盘的结构进行深入研究，确定主体和附件的形态、数量和连接方式，并通过视频动画，形象生动地呈现尊盘纷繁复杂的结构。

创新实践

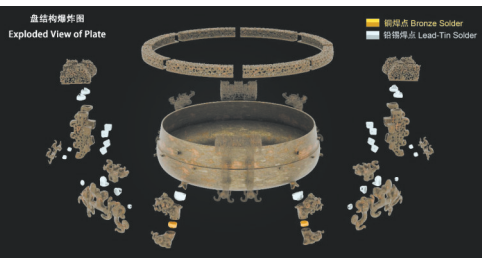
工业级计算机断层扫描(工业 CT)利用高能 X 射线穿透物体，通过多角度投影数据重建三维内部结构。其核心优势在于无损检测能力，可实现复杂构件(如青铜器、精密零件)的三维



曾侯乙尊盘



尊的结构爆炸图



盘的结构爆炸图

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，通过添加滤光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

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 33 只附件、19 只 U 形锁扣、通过 32 处铅锡焊、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、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，进行表面数据高真度拟合，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)



“长城全线实景与三维数据库”已获取超 300 万张高清图像

万里长城，蜿蜒于华夏大地，不仅是中华民族精神图腾的巍峨象征，更是世界文化遗产中体量最为宏大、体系最为复杂的线性遗产。在全球化浪潮与数字化时代交汇的今天，如何让这条沉睡的巨龙焕发新生，如何让其承载的千年智慧与民族精神被深刻理解、广泛传承，成为摆在我们面前的时代命题。

长期以来，长城的多种阐释场景之间相对割裂：数据平台与实地遗存关联度低，对文旅支撑力不足；博物馆展览方式单一、互动性弱，难以与千里之外的遗存“物聚”；而实地游览又常因内涵挖掘不深、区域发展不平衡，导致游客体验“走马观花”，吸引力难以持续。各地各段长城的特色、内涵、价值挖掘和传播不足，使其文化传承和民族精神象征的作用难以彰显。

打通“在线、在馆、在地”三重场景的壁垒，构建覆盖全场景、融合数智技术的研究、保护、传承与阐释体系，是激活长城遗产价值、彰显其时代魅力的关键所在。而要实现多场景的有效贯通，必须以长城的内涵与核心价值为逻辑主线。面对长城遗产规模宏大、构成要素复杂、阐释难度高等现实挑战，依托前沿科技手段构建新型数字化保护体系。在此背景下，以无人机航测、人工智能、数据挖掘等技术为核心的数字化方法应运而生，为长城的系统性研究、整体性保护与创新性传承开辟了前所未有的路径。

破解千年难题：从“不可达”到“全息感知”

作为世界文化遗产中体量最大、分布最广的线性遗产之一，长城横跨中国 15 个省区市，总长度超过 2.1 万公里。其多数段落位于崇山峻岭、荒漠戈壁等极端地形之中，传统人工测绘与调查手段难以覆盖，导致大量遗产信息长期处于“沉睡”状态。

为此，团队建立“长城资源快速采集与数字化管理系统”，该系统由“遗产低空信息采集”和“数据整合”两个步骤组成。“遗产低空信息采集”环节，团队利用无人机对长城开展低空航测以获取高精度的遗产图像与三维数据，低空航测技术具有抵达速度快、遗漏率低、三维数据获取完整等特点，可实现对长城无盲区、全覆盖、高精度的数据采集，截至 2025 年，团队已获取超 300 万张长城遗产高清图像，并可生成高精度三维模型，为长城遗产空间特征提取和病害信息分析等多种需求提供基础数据。

然而海量高精度数据也带来了数据管理的复杂挑战：面对 TB 级影像库与三维模型的高效存储、跨平台调用及可视化检索需求，团队自主编程建立了基于 WebGIS 技术的“长城全线实景三维数据库系统”，基于空间信息定位、整合遗产海量翔实数据，将遗产的高精度图像信息、历史文脉背景与实际位置等要素关联起来，形成全面的遗产数字化数据库，并为后续展示、传播及研究提供了便利条件。

智能挖掘：AI 揭示长城隐藏的“营造智慧”

为了能从海量数据中抽丝剥茧、挖掘长城内涵价值，项目团队创新引入人工智能技术，构建“长城智能化统计分析系统”，对上万处敌楼、烽燧、墙体等建筑单体进行自动识别与特征提取。

该系统由“智能提取”和“全线价值挖掘”两个步骤组成，实现了从海量图像与复杂三维数据中挖掘长城隐含价值。“智能提取”利用目标检测、图像分割等人工智能技术基于独立标注的长城遗产数据集实现特定建筑遗产对象空间特征信息自动提取，统计挖掘长城遗产特征分布规律；“全线价值挖掘”结合古籍文献等史料记载，分析还原长城遗产的历史场景，剖析古代建筑者的设计理念、工程智慧，挖掘遗产背后的社会背景、规划策略与营建技术。

通过目标检测与图像分割算法，团队首次系统梳理出多项长城“之最”：如全线最陡峭的五段墙体、敌楼密度最高的防御区段，并精准绘制病害分布图谱，为后续保护修缮提供科学依据。更令人振奋的是，AI 智能化提取并结合史料对比与空间分析，催生了一系列突破性发现：

暗门完善通关体系：团队在全国多地发现 130 多处暗门实物遗存，填补了“关一口一暗门”三级通关体系的历史空白，还原了明代长城并不是完全封闭的，而是有序下的“开放”。

烽燧家族谱系建立：基于长城沿线多类型墙体遗存实物调查，归类出烽燧家族，揭示出明长城“台下点烟、多烟传烽”的历史场景。

彩色长城颠覆认知：借助图像库，自动统计了长城全线砖、石的色彩分布，发现长城上很多省份都有富彩长城段，彻底打破“长城只有灰色”的固有印象。

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，通过其趣味答题板块，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。

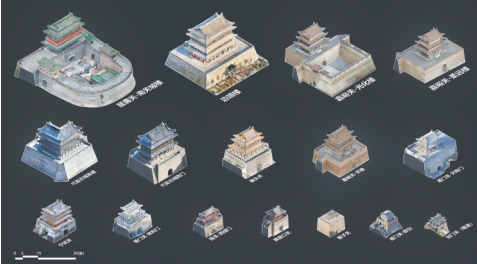
“在地”场景：基于全线长城数据采集与最新研究成果，团队提出“随身伴游”“AR 历史再现”等在线的数字化阐释方案。游客在八达岭、山海关等重点景区，只需扫码即可获取专业语音讲解，并通过增强现实(AR)技术，在手机屏幕上观看真实场景与实景图叠加的沉浸式影像，真正实现“走到哪、学到哪、看到哪”的深度游览体验。

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文化公园建设，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勘测，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；同时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 熊洁

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，形成可对比、可追溯的数字信息，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

球范围内属首创。数据库不仅包含考古信息，还囊括胎、彩、釉、纹饰、工艺、微观结构等科学表征信息，填补了文化遗产数字化标准化建设的空白。

同时，项目形成了“8+X”数据标准体系，即以八项核心工艺信息为基础，结合延展知识信息，建立古陶瓷知识图谱。这一标准体系的提出，为未来跨机构、跨区域的数据共享提供了通用框架，也为文化遗产保护数字化探索提供了范式参考。

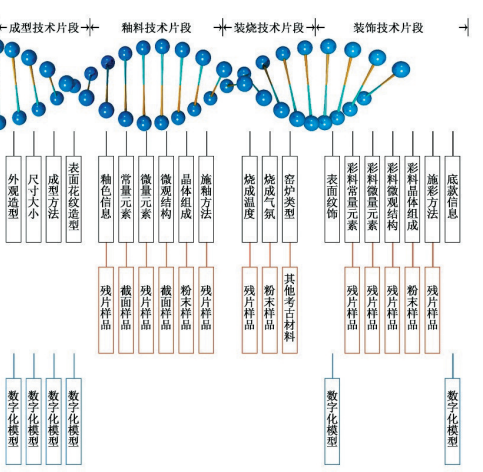
实践成效：让文物“活”起来

经过数年的建设与探索，古陶瓷基因库已在科研、展示、产业和教育等多个领域展现出显著成效。该平台已累计提取近百万条古陶瓷基因数据，获得多项专利与版权，并初步制定了《御窑手工制瓷工艺技术推荐标准》，在国内外学术界形成了示范效应。与此同时，依托数据库资源策划的沉浸式展览“青花秘境”吸引了上百万观众，并先后在德国柏林等地举办数字展览，使中国陶瓷文化走向世界舞台。项目还推动了文创产业的深度转化，基于数据库成果研发出百余款文创产品，孵化出“岁岁鸭”等知名 IP，带动周边手工制瓷产值超过两千万元，实现了文化价值、社会效益和经济效益的协同提升。在教育层面，团队构建了“三维一体”的研学体系，并创新推出“亲子共学”模式，使科研资源得以转化为青少年与家庭可参与的学习体验，让文化遗产保护意识在代际传承中持续扎根。

在 2025 年世界互联网大会文化遗产数字化



2025 年世界互联网大会文化遗产数字化精品展



“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。

当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)