

以故宫博物院为典型代表、集博物馆、古建筑群与旅游景区于一体的大型综合性文博机构，通常存在遗产保护刚性约束与公众服务精细化需求的复杂矛盾，管理工作面临多重挑战。“十四五”国家重点研发项目“大型综合性博物馆数字孪生关键技术研究与服务示范”项目，由故宫博物院牵头，联合国内五所知名高校、三家数字科技头部企业开展系统攻关，探索以数字孪生支撑大型文博机构保护、管理与服务的新路径，并逐步实现从局部试点到全域应用的推广。

保护、服务与管理中的现实困境

故宫博物院自2008年开始筹划文化遗产监测以来，陆续建成了覆盖建筑、藏品、室外陈设、动植物、环境质量等十余个监测系统。但由于建成时间和技术差异，监测数据分散在各个专业系统中，难以形成覆盖全域、贯穿日常的预防性分析、决策保护能力，研判与处置仍较多依赖现场经验。

为进一步促进文化遗产的长期保存和可持续发展，从2015年文化和自然遗产日起，故宫博物院实行每日限流8万人次，但随着文化旅游事业兴旺发展，在暑期和五一、十一旅游黄金周，这一接待量与实际参观需求之间存在着巨大差异，导致近年来“一票难求”矛盾突出。日均8万人次，已达评估测算的“最大承载量”，现场服务人员、设施长期处于饱和、超饱和运营状态，观众的参观期待和实际体验之间存在差异。院内根据需求，陆续建设了数十个支撑各领域业务的管理信息系统，同样面临着技术差异、数据孤岛等问题，各部门难以整体掌握院区运行态势，协同调度效率有待提升。此外，不少珍贵文物因保护条件限制无法常设展出，现场可见的建筑、藏品与其历史背景、工艺知识、空间语境之间的关联不够紧密，观众“看得到却读不懂、走得快却印象浅”的情况非常普遍。

紧扣文博需求为导向的系统研发

在理论层面，项目立足“博物馆—古建筑群—旅游景区”三位一体的机构特点，构建了适用于大型综合性博物馆的数字孪生理论框架。将工业制造、城市治理等领域成熟的数字孪生概念，有针对性地创新应用到文博领域。关注文物与建筑本体、区域空间环境、观众参观行为、内部业务流程等特征维度，回答“数字孪生究竟要解决什么、服务谁、如何持续运转”等根本问题。聚焦文博领域的业务需求和数据来源，提出“三维四类三层级”的数据组织思路：围绕物、地、人建立关联，整合基础信息、文物档案、动态监测和日常管理的4类36项，多达2200万余条数据，构建了数字孪生数据基底，并按照故宫全域、中轴线、核心殿堂等不同精度分级使用，使数据既能服务整体运行，也能支撑重点区域的精细化管理与服务，大幅缩短了数据在系统中流转的链路，更加高效地支撑管理决策。

在技术层面，项目按照管理、服务的不同用户需要分级推进。面向观众服务的统筹管理，重点解决多源信息整合问题，为管理决策提供直观、轻量的数字底图；面向观众参观游览和宣教应用，重点突破复杂遗址快速数字化复原技术，缩短从现场采集到应用的周期；面向核心殿堂等高精度虚拟漫游展示区域，重点解决高仿真数字场景对算力的高需求，提供高速流畅的沉浸式体验。

在应用层面，项目首次建成“故宫智慧管理—服务协同三维可视化平台”，对故宫全域建筑、道路、植物进行了精准定位，在三维数字沙盘上直观呈现安防、客流、展陈、后勤等多个维度的业务数据，支撑日常监测、预警研判、应急指挥和运行调度，形成“发现

故宫博物院数字孪生：从理论突破到全域应用

——大型综合性博物馆数字孪生关键技术研究与服务示范项目

苏怡

问题—辅助决策—落实处置”的管理闭环；并依托同一数字底座开发中轴线、养心殿区域的虚拟参观、AR智能导览、跨时空多人同游、大空间沉浸式体验等公众服务应用，使保护工作中积累的数字资源转化为可感知、可传播的文化产品。

数字孪生平台成果初见成效

平台实现了对文物本体、古建筑、观众活动、环境状况等要素的动态监测与综合研判，已应用于应急指挥、客流疏导、环境监测、建筑形变分析等场景，管理决策逐步从经验判断转向数据支撑。通过客流预测、虚拟预演等手段，能够在开放策划和珍宝馆等重点区域管控中提前研判风险，提升预防性保护水平。对一线管理人员而言，最直观的变化是“信息更集中、态势更清晰、响应更及时”。

在已经发布上线的养心殿在线虚拟漫游中，观众在线的平均停留时长达10~16分钟，足够支撑对养心殿虚拟场景及其中预埋的知识点进行较为充分的游览和理解，远超同类在线体验产品体验时长（2~4分钟）。增强现实导览、多人同步参观、沉浸式体验等应用，对数字孪生体数字资产进行了多个维度、多种形式的复用开发，使不同需求的观众能够按兴趣深入探索，按节奏理解内容，相关成果不仅服务故宫本院的线上线下观众，还应用于香港故宫文化博物馆“纹以载道”展览、基层学校文化普及等场景。

故宫数字孪生平台通过故宫官方小程序、高德和联通的故宫专区扩大线上覆盖面，体现了优质文化资源向社会延伸的可能。项目线下落地大高玄殿数字馆、故宫永寿宫“九重之下—故宫造办处旧址考古成果展”等场景，并在世界互联网大会、数字中国建设峰会等国际重要展览展会交流，受到主流媒体广泛关注。项目已牵头或参与立项国际标准1项、国家标准2项、行业标准3项、团体标准1项，其中在国际电信联盟（ITU-T）立项的《博物馆数字孪生中公众服务的可视化元素》，标志着我国文博实践已踏出了进入国际规则讨论的重要一步。

大型文博机构数字孪生建设的几点思考

故宫博物院项目的实践表明，数字孪生不是给博物馆“贴一个新技术标签”，而是将保护理念、管理模式、服务方式和组织能力进行一次系统性、协同性升级。关键在于坚持以下几个原则：

其一，坚持从业务难点痛点出发。优先解决最紧迫、最现实的管理和服务问题，打通信息、先形成可用平台，再逐步提升精细程度。其二，坚持保护与利用一体化设计。“数字孪生体”资产一旦建成，既要兼顾文博机构管理运行、服务调度等多方需求，也要合理转化为公众可触达、可体验的优质文化产品，在用户需求与数字孪生更新之间建立可持续发展的良性循环。其三，坚持统一建设、分级应用。大型综合性博物馆占地广、业务多、数据多，建立统一的数字孪生底座，再按业务分级配置应用，避免重复建设和数据割裂的“烟囱效应”。其四，坚持研发与规范同步推进。面向文博机构的数字孪生仍处于起步探索阶段，在开展技术攻关的同时，推进标准研究和评价体系建设，有助于形成行业共识，为后续可复制可推广提供共同遵循。

面向未来，大型文博机构数字孪生建设仍将在保护更精准、管理更协同、服务更普惠的方向上持续深化。只有坚持保护为本、服务为民、管理提效、成果共享，数字孪生技术才能真正成为文博事业高质量发展的有力支撑，为文化遗产保护和传承利用提供持久而切实的助力。

（作者单位：故宫博物院）

守护贝叶经千年文脉：从科学认知到技术突破的保护修复之路

李黎

我国贝叶经存藏丰富，仅布达拉宫便珍藏有公元三世纪以来的465部约30000叶，内容涉及宗教、哲学、梵语语法、逻辑学、语言学、文学等多个领域，被誉为“藏文之源、佛教之根、文明之脉”，是研究印度写本学、字体学、中印文化交流史的宝贵第一手资料。

受环境变迁与人为因素影响，部分贝叶经存在糟朽脆化、墨迹色料脱落、污渍霉斑、纤维起翘开裂等严重病害。与此同时，贝叶经保护工作在系统性理论和专项修复技术方面存在双重短板：文物本体材料基础信息、病害诱发机理、防治方案、专用加固材料、精细化清洗工艺等尚未形成完善的保护体系，标准化和规范化的保护修复行业准则长期缺失，成为制约贝叶经保护的核心瓶颈。

针对贝叶经保护的紧迫难题，国家重点研发计划项目“贝叶经保护修复关键技术及应用示范”依托科技创新开展专项技术攻关。

本体认知与劣化机理研究

在本体认知方面，研究团队融合植物学、分析化学、历史文献学等多学科方法，系统研究了贝叶经的源植物种类、纤维特性、化学成分及老化机制。利用显微CT与热裂解—气质联用技术鉴定特征标志物，填补了贝叶经植物原材鉴定的技术空白，并证实西藏与云南的古代贝叶均由贝叶棕制成。

在贝叶经韧性量化评估方面，研究团队建立了“结构特征—物理性能—力学性能”综合量化评估体系。通过调控老化条件，制备不同脆化样本，利用扫描电镜等观测分析贝叶经纤维束连接状态及细胞壁内部结构，揭示贝叶经脆化本质。同时，基于太赫兹光谱与挥发性有机物特征，结合随机森林、偏最小二乘回归等算法，构建脆化程度预测模型，实现无损快速诊断。

在墨迹色料研究方面，团队综合运用多种无损/微损技术，系统解析贝叶经墨迹色料的成分与附着方式。通过干湿交替与紫外老化实验，发现“干—湿—紫外”多因子协同显著加剧开裂与褪色。利用机器学习与模糊综合评价，构建了墨迹色料劣化评价模型与稳定性评估体系，为保护措施提供核心理论支撑。

保护修复技术体系的构建

基于前述科学认知，项目围绕贝叶经保护全流程，依照“本体认知—劣变机制—材料研发—应用示范”的技术路线，构建涵盖增韧加固、墨迹固色显色、污染物清洗、保护修复规范的系统技术方案。

针对脆化这一核心病害，项目开发了两类增韧材料：缓释增韧材料和离子液体材料。这两类材料均经结构表征、释放在

问题—辅助决策—落实处置”的管理闭环；并依托同一数字底座开发中轴线、养心殿区域的虚拟参观、AR智能导览、跨时空多人同游、大空间沉浸式体验等公众服务应用，使保护工作中积累的数字资源转化为可感知、可传播的文化产品。

数字孪生平台成果初见成效

平台实现了对文物本体、古建筑、观众活动、环境状况等要素的动态监测与综合研判，已应用于应急指挥、客流疏导、环境监测、建筑形变分析等场景，管理决策逐步从经验判断转向数据支撑。通过客流预测、虚拟预演等手段，能够在开放策划和珍宝馆等重点区域管控中提前研判风险，提升预防性保护水平。对一线管理人员而言，最直观的变化是“信息更集中、态势更清晰、响应更及时”。

在已经发布上线的养心殿在线虚拟漫游中，观众在线的平均停留时长达10~16分钟，足够支撑对养心殿虚拟场景及其中预埋的知识点进行较为充分的游览和理解，远超同类在线体验产品体验时长（2~4分钟）。增强现实导览、多人同步参观、沉浸式体验等应用，对数字孪生体数字资产进行了多个维度、多种形式的复用开发，使不同需求的观众能够按兴趣深入探索，按节奏理解内容，相关成果不仅服务故宫本院的线上线下观众，还应用于香港故宫文化博物馆“纹以载道”展览、基层学校文化普及等场景。

故宫数字孪生平台通过故宫官方小程序、高德和联通的故宫专区扩大线上覆盖面，体现了优质文化资源向社会延伸的可能。项目线下落地大高玄殿数字馆、故宫永寿宫“九重之下—故宫造办处旧址考古成果展”等场景，并在世界互联网大会、数字中国建设峰会等国际重要展览展会交流，受到主流媒体广泛关注。项目已牵头或参与立项国际标准1项、国家标准2项、行业标准3项、团体标准1项，其中在国际电信联盟（ITU-T）立项的《博物馆数字孪生中公众服务的可视化元素》，标志着我国文博实践已踏出了进入国际规则讨论的重要一步。

大型文博机构数字孪生建设的几点思考

故宫博物院项目的实践表明，数字孪生不是给博物馆“贴一个新技术标签”，而是将保护理念、管理模式、服务方式和组织能力进行一次系统性、协同性升级。关键在于坚持以下几个原则：

其一，坚持从业务难点痛点出发。优先解决最紧迫、最现实的管理和服务问题，打通信息、先形成可用平台，再逐步提升精细程度。其二，坚持保护与利用一体化设计。“数字孪生体”资产一旦建成，既要兼顾文博机构管理运行、服务调度等多方需求，也要合理转化为公众可触达、可体验的优质文化产品，在用户需求与数字孪生更新之间建立可持续发展的良性循环。其三，坚持统一建设、分级应用。大型综合性博物馆占地广、业务多、数据多，建立统一的数字孪生底座，再按业务分级配置应用，避免重复建设和数据割裂的“烟囱效应”。其四，坚持研发与规范同步推进。面向文博机构的数字孪生仍处于起步探索阶段，在开展技术攻关的同时，推进标准研究和评价体系建设，有助于形成行业共识，为后续可复制可推广提供共同遵循。

面向未来，大型文博机构数字孪生建设仍将在保护更精准、管理更协同、服务更普惠的方向上持续深化。只有坚持保护为本、服务为民、管理提效、成果共享，数字孪生技术才能真正成为文博事业高质量发展的有力支撑，为文化遗产保护和传承利用提供持久而切实的助力。

（作者单位：故宫博物院）

文物科技自立自强，是文化遗产系统性保护、考古事业高质量发展的核心支撑，当下我国考古研究与出土文物保护迈入精细化与科学化新阶段。大量考古遗存与出土脆弱文物，其内部结构获取与劣化程度评估普遍面临检测难、转运险、解析慢等共性难题，传统无损检测技术已难以适配新时代田野考古与现场保护工作的新要求。依托国家重点研发计划项目“移动式文物X射线断层成像关键技术及装备”（2023YFF0906600）的联合攻关，国内首款文物专用移动式X射线断层成像系统成功研发落地，补齐了我国考古现场高端无损检测国产装备短板，完善了脆弱出土文物无损检测技术体系。

聚焦核心考古需求 应对考古现场脆弱文物移动、提取风险

考古遗存与出土文物材质多样、形态各异，大量状态脆弱，长距离转运极易造成不可逆的损伤。长期以来，国内考古文博领域依赖通用工业CT、医疗CT开展内部结构检测，相关技术模式适配工业产品、人体检测，并不兼容文物特性与最小干预的准则，衍生四大技术短板，制约考古研究与现场保护工作纵深推进。

其一，工业CT采用载物台旋转的扫描模式，对于脆弱、异形出土文物，尤其是长轴型、高重心文物的转动扫描存在倾覆碎裂风险，而采用机架旋转的医疗CT其射线能量较低，对于金属等高密度材质与厚度较大的文物难以穿透，造成了大量文物难以安全地开展无损检测；其二，为保障辐射安全，目前工业CT设备需固定在屏蔽实验室内，对于考古套箱、出土脆弱文物的CT检测必须依靠异地转运，对文物安全与检测时效性、经济性带来了新的挑战；其三，为满足成像精度与成像效果，目前国内对于高密度材质文物的CT成像多采用单排线阵列探测器组件，成像速度较低，影响了出土文物检测的效率；其四，目前使用的通用成像软件与分割算法，未针对文物复杂特性进行优化设计，难以快速获取高质量的CT图像，对于拆分复杂遗存边界、内部缺陷与材质分层结构，需要大量依赖人工经验，使用门槛高、难度大。

针对上述行业难题，面向考古研究与出土脆弱文物的无损检测需求，研发适配考古与文物保护场景、技术自主可控、安全便捷的文物专用X射线CT装备，已然成为新时代文物科技领域迫在眉睫的攻坚任务。

开展专项技术攻关 构建移动式断层成像检测自主技术体系

立足考古与文物保护需求，项目团队坚守“安全优先、需求导向、自主可控、全域可用”的研发理念，完成全链条技术攻关，实现设备架构、核心硬件、移动屏蔽、智能算法等原创性技术突破。

在设备架构与扫描方式方面，装备采用卧式旋转机架结构，文物或考古套箱全程放置于扫描床体，由射线源、探测器集成式机架环绕文物采集数据，从根源规避工业CT扫描时器物转动带来的破损风险，

攻克考古现场无损检测难题 守护脆弱出土文物瑰宝

曲亮

——移动式文物X射线断层成像关键技术与装备研发实现创新突破

适配易碎松散、形制特异脆弱文物及大型考古套箱检测作业。同时设备采用机架、床体双联动移动设计，可灵活适配超长形制文物与特别脆弱的文物扫描作业。

在核心技术与硬件研发方面，项目自主研发“高能高空间分辨率排线阵小像素探测器”，打破国内高能射线成像单排线阵的技术局限，实现从“单排”到“多排”的技术跨越，并配套研发低噪声读出电子学系统与高速数据传输模块，大幅提升图像对比度与成像效率，解决了传统高能线阵探测器成像慢的问题。同时，系统搭载最高加速电压450kV小焦点X射线源，在保证强射线穿透能力的同时，兼顾空间分辨率，可覆盖金属、陶瓷等绝大多数出土文物的检测需求。

在场景适配与移动屏蔽方面，装备创新采用“集装箱式一体化舱体设计”，实现可吊装、可转运、可就地作业，打破固定实验室地域限制，打通考古现场原位无损检测“最后一公里”；同时舱体采用“差异化屏蔽设计”，在确保辐射安全的前提下进行减重设计，提升设备的可通过率。整套屏蔽系统已通过第三方权威机构的辐射检测与环境评价验收，全面保障操作人员与周边环境安全。

在软件研发与智能算法方面，项目配套开发文物专用X射线断层成像控制与智能分析系统，功能覆盖数据采集、参数控制、图像重建、离线分析、质量控制全流程，并依托机器学习算法，研发基于文物材质密度与图像特征的“图像增强技术”与“智能分割技术”，实现自动区分文物本体、内部空腔、病害区域以及复合材质边界，大幅提升复杂文物信息解读的效率与准确性。

形成行业首创设备 探索考古研究与出土脆弱文物无损检测新模式

整套装备立足我国文物特性研发，核心探测器、设备架构与整机、成像算法等全部国产化，完善了我国文物无损检测自主技术产业链，夯实了文物科技自立自强根基，填补国内移动式高能文物专用CT装备空白。区别于传统设备“送检入馆、异地检测、检后解析”被动模式，本套移动式断层成像装备拟构建考古遗存与出土脆弱文物内部结构无损探测“现场作业—快速扫描—及时解析—科学处置”的主动式作业模式，全方位提升考古研究与文物保护精细化水平。

自主知识产权专用装备的研发与应用是建设中国特色、中国风格、中国气派考古学的重要支撑，移动式文物X射线断层成像关键技术与装备研发，是我国考古与出土文物保护研究由经验判断转向科技实证与数据赋能的标志性成果。

下一步，项目团队将紧扣实际需求，持续迭代成像技术与智能算法，开展设备应用示范、完善作业标准化体系，加快技术成果行业规模化推广。未来该技术将深度融入重大遗址考古、濒危脆弱等文物专项保护工作，以自主科创新装备守护出土文物安全底线，以无损科技手段深挖地下文明密码，持续完善中国特色文物保护科技体系，为传承中华优秀传统文化、建设文化强国筑牢硬核科技保障。

（作者单位：故宫博物院）

土遗址冻融破坏机理与监测技术研究

裴强强

土遗址冻融环境的分布特征更加清晰，为不同区域土遗址面临的冻融风险提供了空间认知依据。基于此，地方政府可根据自身所处区划和遗址本体的重要性，有针对性地确定冬季巡查重点、监测布点位置和防护等级，以及开展相应保护工程应重点关注冻融影响特点，避免因环境认知不足出现防护措施不到位或投入失衡等问题，为土遗址日常管理和风险预判提供了支撑。

聚焦高寒高湿区、积雪融区与植被覆盖积雪区等3类典型冻融环境，明确了冻融作用下粉化掏蚀、片状剥落、顶端滑移和根系层分离等病害的破坏模式和环境特征；深度挖掘土遗址环境与病害海量监测数据，凝练典型冻融区域的环境因子时序数据，确定与实际环境因子序列高度一致的周期性时序特征指标，精简低频率、高频率、弱响应因子的加载量，明确单一因子的周期性加载参数，基于典型冻融病害的演化模式与相似性理论，构建了考虑时序、幅值与频次等特征的环境高相似度仿真加载数学模型，形成了基于冻融环境多要素模拟的加速实现路径；根据土遗址冻胀粉化破坏的边界条件，设计了标准尺寸试样冻融循环试验极值加载边界条件，为室内足尺模型试验设定了考虑温度、盐分补给、降雪量与阴阳面的环境模拟加载工况；根据片状剥落、根部掏蚀、顶端滑移和根系层分离等病害发育过程的多参数捕捉，揭示了差异冻融环境水—盐—热—力耦合作用下土遗址发生结构变化—物质分异—性能衰退—结构失效的作用机制。通过对典型冻融环境的系统模拟，以往只能在现场长期观察的病害演化过程在实验条件下实现加速再现，使冻融破坏的发生条件和发展规律更加直观可控，为判断不同环境条件下病害的易发类型和发展速度提供了重要参考。

（下转8版）

随着文物保护理念由注重抢救性保护向抢救性与预防性保护并重转变，土遗址保护逐渐由濒危遗址抢救性关键技术攻关，转向预防性保护为目的的机理研究。“十一五”以来，在科技部和国家文物局的持续支持下开展了土遗址关键技术研发与土遗址表面劣化和结构失稳病害机理的初步探索，抢救了一大批濒危土遗址。围绕土遗址预防性保护中的浅表层劣化机理研究仍不够深入，相对于降雨、温度、风沙和盐害等因素，冻融作用诱发的土遗址病害机理尚未得到有效关注，而我国72.4%的土遗址分布在冻土区，土遗址冻融病害成为当前学界关注的焦点。因此，针对冻融环境响应特征不明、浅表层劣化机理不清、劣化宏—微观表征方法不完善、原位监测技术不成熟等难题，土遗址冻融破坏机理与监测技术研究成为土遗址预防性保护的重大科学问题和需求。

项目按照“冻融响应—演化机制—指标表征—应用示范”全链条一体化实施思路，通过风险区划、数值计算、足尺模拟、机制推演、表征分析、装置研发、应用示范等手段有机结合，基于土遗址冻融病害分布特征及赋存环境特征，典型冻融环境下土遗址水—盐—热—力耦合演化机制、土遗址冻融劣化宏—微观表征方法与关系、冻融病害原位监测技术装备研发与应用示范等4个课题的研究，全面实现“土遗址冻融破坏机理与监测技术研究”的总体目标。

项目考虑冻融、积雪天数等频次，周期、幅值等环境要素提出了土遗址冻融区划标准，完成了5个大区、21个亚区、42个小区的划分，构建了土遗址冻融环境多层次区划体系；调查了分布于我国10省的29处土遗址，发现青藏大区、西北大区、东北大区土遗址受冻融作用最为明显，其中甘肃天祝长城、新疆北庭故城、内蒙古元上都遗址分别为上述三个大区冻融环境影响的典型代表；完成了典型区域病害的实地调查，构建了土遗址冻融病害分类方法，总结了冻融病害演化过程，归纳了典型病害诱发—萌生—发育—破坏等不同阶段的特征；构建了病害易发性评价，环境因子与典型冻融病害关系模型，完成了冻融病害空间预测。上述研究成果使我国土