

文化遗产是凝结民族记忆的不可再生的精神财富，保护任务紧迫。传统保护依赖人工监测与修缮，存在精度低、效率差及二次损伤风险，传播范围有限。随着人工智能、大数据及物联网技术发展，数字化手段凭借高精度采集与智能修复优势，推动保护模式从被动挽救转向主动防范，从孤立维护升级为综合管理。全球实践呈现差异化格局，本文系统梳理技术应用现状，解析现存难点，概括核心特征，前瞻发展动向并提出优化方案，为完善保护技术体系提供理论与实践参考。

文化遗产数字化保护技术应用现状与核心特征

在技术应用主体层面，企业、科研机构与社会力量协同发力，形成多元参与格局。腾讯通过“探元计划”构建文化科技创新生态，其龙门石窟浅浮雕数字化项目入选《世界互联网大会文化体系数字化案例集（2025）》。在克孜尔石窟保护中，应用太赫兹技术穿透千年烟渍，结合AI完成壁画残损部分虚拟补全；与福建合作的土楼数字化项目，通过游戏引擎复刻复兴楼并融入客家十番音乐等非遗传元素，带动2024年永定土楼游客量增长8.16%。科研机构主导技术突破：浙江大学建立文物数字化“基因库”，开发专用扫描机器人以适应石窟极端环境；西北大学与秦始皇帝陵博物院合作研发AI虚拟修复系统，将兵马俑碎片拼接效率提升6倍；龙门石窟研究院联合武汉大学构建微痕浅浮雕保护体系，形成可复制的技术范式。社会层面参与度显著提升，世界互联网大会案例征集吸引全球20国近200个项目申报。科大讯飞“方言保护平台”通过AI技术吸引百万人参与数据采集；准格尔旗十二连城遗址项目采用“天空地”一体化采集方案，构建公众可参与的数字应用平台，实现专业保护与公众传播的协同推进。

当前，数字化保护已形成数据采集、智能修复、动态监测与沉浸式传播的全链条技术体系，技术协同效应显著提升保护效能。技术迭代推动数字化保护进入多技术融合、场景适配与主体协同的新阶段，呈现鲜明的时代特征。

在技术应用层面，数据采集已从二维扫描演进为三维建模与多模态信息捕获，实现全方位高精度保存。国内敦煌研究院以0.1毫米精度构建“数字敦煌”，全球访问量超10.8亿人次；应县木塔通过机器狗协同检测，误差控制在0.01毫米内。国际上，庞贝古城以0.5毫米精度完成80%区域扫描，创建“数字庞贝”；帕特农神庙0.05毫米精度扫描为AR导览提供核心数据，助力复原浮雕原貌。智能修复领域，人工智能推动保护模式从“人工主导”转向“人机协同”：秦兵马俑AI修复效率提升6倍，准确率提升98.5%，可复原原始色彩细节；“数字藏经洞”文献拼接精确度达99.2%。乌菲兹美术馆通过AI分析画作纹理制定修复方案，错误率低于2%；中希联合研发的系统使陶瓷碎片拼接成功率达89.2%，效率提高15倍。实时监测方面，物联网与AI技术构建遗产全生命周期“健康监测与预警系统”：敦煌石窟部署500余传感器，实现暴雨渗水96小时预警，准确率超92%；西安城墙3000余监测点，使病害发生频率降低45%；比萨斜塔与庞贝公园监测系统均提升了保护工作的主动性。沉浸式传播领域，VR/AR技术突破时空限制，助力“云游敦煌”“全景故宫”实现文化遗产全民共享；故宫数字文物库访问量超9亿次；敦煌AR项目使游客平均停留时长从38分钟延长至2.5小时，“数字敦煌”2024年访问量达2300万次，覆盖78个国家；“VR西斯廷教堂”“虚拟奈良东大寺”等项目促进文化遗产价值的全球传播。

核心发展特征体现为技术融合化、应用场景化与合作国际化。技术融合化构建“感知—分析—决策—执行”全链条智慧保护体系，应县木塔数字孪生项目与欧盟“Europeana”平台均完成这一转型。应用场景化强调针对不同遗产属性定制方案：敦煌研究院结合大数据、GIS及物联网技术，建立150余处中小石窟综合监测体系，病害预警效率提高50%；卢戈城通过高精度扫描实现保护与虚拟旅游双重赋能；故宫对《千里江山图》实施超高精度扫描，为学术研究提供高质量素材并降低实体损耗。合作国际化形成技术共享与项目共建格局：“数字敦煌”向海外共享9000余件文物的11万张高清资源，被全球200余所高校及科研机构引用；中希联合实验室完成120余件文物虚拟修复；欧盟“Europeana”平台汇集27国资源，协助文化机构降低数字化成本并减少30%协作支出。

文化遗产数字化保护技术面临的挑战

尽管数字化保护成效显著，但在技术规范、区域均衡、伦理治理与可持续性等方面仍面临挑战，制约规范化发展进程，亟待系统性破解。技术标准碎片化制约协作效能。各国技术规范差异显著，数据采集精度、文件格式与元数据描述尚未

形成全球统一标准，国际合作成本高。例如，卢浮宫与乌菲兹美术馆三维模型格式不兼容，欧盟“Europeana”项目格式转换投入占预算15%的经费；中外元数据描述差异导致国际数据利用率下降超40%。目前核心领域国际统一标准不完善（仅30%国家采用统一三维模型标准），我国建筑行业存在BIM规范缺失、三维审核标准空白等问题。

数字鸿沟加剧区域保护失衡。全球数字化保护水平地域差异显著，主要体现在硬件设施、技术能力与人才储备方面。联合国教科文组织报告显示，撒哈拉以南非洲数字化项目仅占全球3.2%，具备系统保护能力的机构不足1%；多数发展中国家因设备、网络及专业团队缺失，难以开展系统性保护。欧洲发达国家博物馆年均数字化投入经费高，已构建完善体系；发展中国家复合型人才缺口超10万，进一步拉大保护能力差距。

伦理边界模糊对技术应用合理性边界提出挑战。人工智能修复的核心矛盾是平衡“修复完整性”与“遗产真实性”，部分实践存在技术应用偏离文化语境的风险。例如，西班牙阿尔塔米拉洞穴壁画AI修复偏差率超15%，违背真实性原则；全球已出现8起脱离历史语境的修复案例，损害遗产文化内涵。调查显示72%的考古学者认为AI修复伦理规范亟待健全。

数字化保护可持续性面临挑战，存在资源供给不足与效能转化不畅问题。数字遗产长期保存面临技术迭代与成本压力：庞贝古城30%早期数字数据因技术更新无法读取，需重新扫描；数字资源存储维护年均投入占总成本40%，60%中小型文博机构因资金不足无法长期维护，存在数字资源流失风险。过度依赖AI可能降低修复工作的人文关怀。

文化遗产数字化保护技术的发展态势与优化路径

技术迭代推动数字化保护向智慧化、均衡化、伦理化与产业化发展，目标是实现技术创新与人文价值融合。针对当前挑战，需从五方面协同推进高质量发展。

技术创新向智能化、精细化与全息化深入发展。数字孪生技术预计2030年广泛应用于重要遗产保护，构建“物理实体—数字镜像”双向协同体系。行业专用大模型实现从“数字复刻”到“智能认知”的技术突破，支撑壁画还原、病害诊断等场景。多模态采集技术融合激光扫描、太赫兹检测，实现全息化存档；故宫通过多技术协同完成文物高精度采集存档。

协同发展向标准化、均衡化与国际化深入。2024年5月ISO/TC 349成立，是全球首个文化遗产保护国际标准化机构，正与联合国教科文组织推动全球统一规范制定。“一带一路”共建国家加强标准适配与合作，通过技术转移、人才培养助力发展中国家提升能力；中国已从技术接受者转变为输出方，预计2030年发展中国家数字化项目占比将超20%。

价值转化向产业化、多元化与全民化扩展。数字藏品、数字化文旅等新业态发展，全球数字文旅市场逐年扩容。VR/AR技术构建沉浸式传播载体，为游客提供沉浸式文化体验，推动全民共享生态建设；数字文旅需求呈现多元化与个性化趋势。

伦理治理向规范化、系统化与跨学科发展。制定AI修复伦理准则，组建跨学科审核团队，优化数字资源知识产权保护机制；例如，意大利文化遗产数字化伦理委员会建立“技术评估—公众参与—动态调整”三阶治理流程，对AI修复项目进行全生命周期伦理监管，其经验为全球提供了可借鉴的治理范式。

优化路径需从五方面协同推进：一是强化技术创新，加大数字孪生、行业专用大模型研发投入，推动产学研用融合，推广可复制方案，降低中小机构应用门槛。二是优化协同机制，参与国际标准制定，推动国内数据共享，通过“数字丝绸之路”缩小数字鸿沟。三是培育复合型人才，构建跨学科培养体系，增设专业方向，强化培训与激励。四是加大资金投入，设立专项扶持资金，发展数字文创，鼓励社会资本参与。五是完善伦理规范，明确AI修复核心要求，优化知识产权保护，组建伦理审核团队。

数字化技术推动保护模式从“被动应急”向“主动防范”，从“局部守护”向“系统管理”转变。当前已构建全链条应用体系，呈现技术融合化、应用场景化及合作国际化特征，在故宫、敦煌、秦兵马俑等案例中成效显著。但仍面临挑战：技术标准碎片化、数字鸿沟突出、伦理边界模糊、可持续性不足。未来应以技术革新为核心，以协同发展作为支撑，人才、资金、伦理为保障，推动向智能化、均衡化、伦理化及产业化迈进，实现技术与人文统一。文化遗产数字化保护既是技术创新，也是文化传播理念的革新，需坚持技术与人文并重、全球视野与本土实践相结合，保护文明遗产，构建全球保护协作体系。

2026年是《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》（以下简称“十五五”规划）的开局之年，亦是我国全面建设社会主义现代化国家关键阶段的起步之年。“十五五”规划明确提出“加强文化遗产保护传承；推动文化遗产系统性保护和统一监管，推进管理资源整合，建立文化遗产保护督察制度”，为新时期我国文化遗产保护事业划定了核心方向与行动框架。我国作为文物资源大国，广袤国土上分布着数量庞大、类型多元、价值突出的不可移动文物，作为重要物质载体，集中呈现了中华民族的悠久历史与灿烂文明。根据第三次全国文物普查结果，我国现存不可移动文物总量约76.67万处。从万里长城、故宫、布达拉宫等具有全球影响力的文化地标，到散落于乡野间的古桥梁、古碑刻、古村落等乡土文化遗存，每一处文物本体、每一座古建筑，均承载着中华文明的核心基因密码，记录着中华民族发展演进的历史脉络，彰显着东方美学的独特精神内核。这类不可再生、不可替代的珍贵文化资源，不仅是中华民族的文化瑰宝，更是全人类共同的精神财富与历史遗产。

我国不可移动文物的存续面临自然与人为维度的多重风险威胁，文物安全始终是文化遗产保护工作不可逾越的红线、底线与生命线。发展新质生产力、推进经济社会高质量发展，是新时代我国经济社会发展的核心主题。而“天空地”一体化文物监测体系，正是以科技创新赋能文化遗产保护、推动文物事业高质量发展的典型实践，其深度契合新质生产力“高科技、高效能、高质量”的核心本质特征。立足新发展阶段，加快构建与完善“天空地”一体化文物监测体系，已成为新时期文物保护工作的核心任务之一。“天空地”一体化文物监测体系并非各类单一监测技术的简单叠加，而是通过“天、空、地”三级监测网络的协同联动与优势互补，构建形成“宏观全域覆盖、中观精准巡查、微观实时监测”的立体化监测格局，进而实现对各类文物安全风险的全方位、全维度防范与管控。

“天”层监测网络是整个体系的“高空瞭望单元”，依托高分辨率卫星遥感技术，实现对全国不可移动文物本体及其周边环境的全域性宏观覆盖。通过搭载高光谱传感器、高分辨率光学成像设备的遥感卫星，可高频次捕捉文物保护单位与建设控制地带内的违法建设、地形形变、生态环境破坏等风险信号，有效突破地理空间条件的限制，即便是位于偏远山区、荒漠戈壁等人工难以抵达区域的文物遗址，也可实现常态化、高精度的遥感监测。通过多时序卫星影像的比对分析，可精准识别与锁定违法违规活动斑迹，充分彰显了科技创新在文物监管领域的应用实效与震慑效力，推动文物行政执法模式从传统的“被动应对处置”向“主动预警防控”转型。

“空”层监测网络是整个体系的“机动巡查单元”，通过无人机编队搭载多光谱成像、热红外传感、激光雷达（LiDAR）等先进监测设备，重点针对田野文物、偏远遗址等传统人工巡查模式难以全面覆盖的区域，开展高灵活性、高机动性的精细化巡查作业。基于无人机巡查数据，结合大数据与云计算技术开展智能识别，可大幅提升文物巡查的工作效率与识别精度。同时，无人机具备机动灵活、操作便捷的技术优势，能够有效穿透植被遮蔽，深入山区、河谷等复杂地

形区域，获取毫米级精度的地表三维数据，精准捕捉文物遗址本体的细微形变与环境变化；不仅可为文物本体建立高精度数字档案，更能实现对文物安全隐患的全面识别与精准定位，弥补了传统人工巡查模式的覆盖盲区与精度短板，同时降低了野外巡查作业的安全风险，实现了对文物遗址的全方位、无死角排查管控。

“地”层监测网络是整个体系的核心价值在于“多网协同联动、全维精准高效”，该技术体系已在生态环境保护、水利流域治理、应急管理、农业生产等多个领域实现成熟规模化应用，取得了显著的成效。随着相关技术的持续迭代与成熟完善，“天空地”一体化监测体系正逐步成为我国文物保护领域的核心科技支撑。该体系在多领域形成的成熟应用模式、丰富实践经验，以及文博行业内已落地的成功案例，为其在文物保护领域的全面推广应用提供了坚实的技术支撑与实践参照。与此同时，依托中国文物云平台、智能算力基础设施与文物行业可信数据空间，融合卫星遥感、无人机巡检、物联网感知、人工智能分析等前沿技术，构建形成“智能感知、精准预警、高效处置、全程可溯”的文物安全风险数字化防控体系，可有效提升文物风险的早期识别、动态监测与突发事件协同处置能力，将各类安全风险遏制在萌芽阶段，构建起全流程、全链条的监管闭环，全面增强文物保护工作的主动性、精准性与有效性，推动文物保护模式实现从“被动应对处置”向“主动预警防控”、从“经验型判断”向“数据化决策”的根本性转型。以科技创新为文物保护事业注入核心动能，以智慧化监管守护中华历史文脉，为筑牢文化遗产保护底线、实现文物事业高质量发展构建起坚不可摧的科技防线。

文物本体的存续具有不可逆性，在自然营力与人为活动的双重作用下，其消亡风险始终存在。长期的风化侵蚀、地质灾害、环境变迁与结构劣化，会对文物本体造成持续性的渐进性损害；而违法建设、盗掘破坏、过度开发、管护缺位等人为活动，更会直接加剧文物的损毁甚至灭失。加强文物系统性保护、守护历史文化遗产，既是对历史负责、对民族负责，更是对未来负责，具有突出的战略重要性与现实紧迫性。唯有将文物保护工作摆在文化建设的突出位置，坚守保护底线、健全管理体系、强化科技支撑、完善监管机制，才能有效抵御自然与人为的双重维度的风险威胁，延缓文物本体的衰变进程，遏制各类违法破坏行为，最终实现文化遗产的长久保存与永续传承。在新时代发展背景下，以系统化、数字化、智能化手段构建全方位、全维度的文物保护新格局，推动文物保护工作由被动应对向主动预防的系统性转型，方能切实守护好中华文明的精神标识与文化瑰宝，保障中华历史文脉绵延不绝、世代相传。

科技赋能文化遗产传承 智慧监管筑牢文物安全防线

周巍

“天空地”一体化不可移动文物监测体系的构建逻辑与实践价值



“天空地”一体化文物监测体系

本版责编：张 硕 陈尚宇 何文娟
版式设计：奚威威