■科技保护

缪子成像技术在北海白塔结构探测中的应用

中国文化遗产研究院石窟保护团队

在新时期文物保护工作系统谋划、整体推进的背景和要求下，科技对文物工作的支撑引领作用日益显著。近年来，中国文化遗产研究院以打造文物领域“国家队”为使命担当，着力加强文物保护领域科技攻关，通过聚焦不可移动文物的结构探测和监测等关键问题，推动科技赋能文物保护。

宇宙线缪子成像技术具有无源、无损、高精度等优势，缪子探测技术及其应用已引起国内外的广泛关注，包括安全检查、工程设施结构检测、地下结构探测等多种应用场景。除了广泛应用于地球科学和安全领域，缪子成像技术在文化遗产保护领域也有重要的应用前景。中国文化遗产研究院石窟保护团队近期成功将该技术应用到北海白塔的内部结构探测中，为北海白塔的保护设计提供了重要科学支撑。

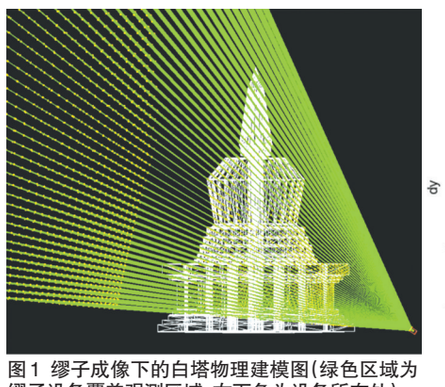

图1 缪子成像下的白塔物理建模图(绿色区域为缪子设备覆盖观测区域，右下角为设备所在处)

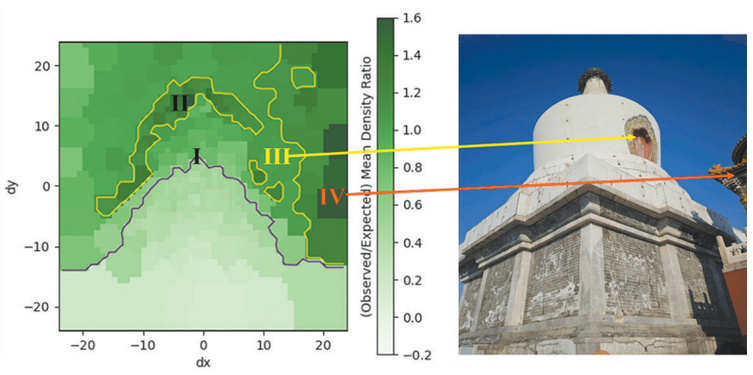

图2 基于宇宙线缪子的白塔内部密度结构成像图(左)，白塔实物图(右)

宇宙线缪子成像方法是近年来新兴的大型物体内部密度结构成像方法。缪子透射成像方法是基于缪子与在介质中传播时的能量衰减与密度沿路径的积分相关，因此缪子透射成像方法对密度结构敏感，能够实现类似地震层析成像效果的地壳浅层数百米深度二维/三维密度结构成像，因而在火山、隧道、地下空间、矿产资源等密度异常结构相关的高精度、高分辨率探测和成像中具有广泛的应用空间。

在大型不可移动文物如砖石古塔和石窟石刻等结构探测中，内部结构的探测对于文物古迹的安全稳定性评估及加固设计至关重要。然而，由于技术限制和文物的特殊性，传统的地球物理探测手段往往因其具有破坏性和空间分辨率不足的局限，只能获取表面结构或局部结构特征，对于文物内部结构的精细化、深层次的无损成像还没有很好的解决办法。

长期以来，大型不可移动文物内部结构的探测，如埃及金字塔、秦始皇陵等内部深层次结构的探测是考古和文物保护学者孜孜以求的梦想。同时，近年来的极端天气事件频发，火灾、洪水、地震等气候灾害和地质灾害给大型不可移动文物的安全性评估和保护带了巨大挑战。因此，迫切需求无损、高精度的内部结构探测技术，来解决大型不可移动文物结构及其演化规律这一关键科学问题。

近年来，国内外学者将缪子成像技术与文化遗产保护和考古相结合进行了探索。2017年，法国巴黎遗迹创新保护研究所和日本名古屋大学团队采用缪子成像技术在胡夫金字塔的内部发现了一条长9米、宽2.1米的新通道。2023年，意大利学者利用缪子发现了古墓群里长约11米、宽约8−10米的未知的洞穴，并用已知的洞穴做了验证。此外，华北电力大学团队针对镇岗塔和历史城墙等不可移动文物也做了缪子成像技术的先验性验证。通过上述研究发现，一方面，缪子探测技术正在引起文化遗产保护和考古领域的关注和重视，反映出缪子探测技术在文物结构探测中的广泛前景，同时，缪子探测技术应用于大型不可移动文物的精细化、深层次探测还有很多挑战。

2023年，中国文化遗产研究院在北海公园管理处的支持下，在北海白塔持续开展缪子探测技术的应用。北海白塔位于北海公园制高点，外部封闭且形制特殊。根据清史档案，乾隆至光绪年间均有修葺白塔的记述。1964年国家对白塔进行了彻底修复。1976年唐山大地震波及北京，白塔相轮石座挤压破碎，导致相轮歪闪，华盖天盘上的日月易位，为此，1977年国家又进行了大规模的修缮。经现场勘察，白塔目前发育了大量石质构件倾斜歪闪、黏土砖鼓胀外突、结构层空鼓变形等结构性病害，以及风化裂隙切割、表面可溶盐、渗水和锈蚀等风化病害。据历史档案资料检索和走访调查，白塔内部的精确结构特征亟待探明，仅有零散的口述相传的少量资料。这既不利于白塔的展示利用及价值的完整体现，也影响了白塔病害发育机理的深入研究及科学保护。

针对这一关键问题，中国文化遗产研究院石窟保护团队利用缪子成像技术，开展了北海白塔的内部结构探测的前沿性科学实验。这项实验的核心是一台高精度的宇宙线缪子成像的接收设备，它被安置在白塔的底部西南角，进行了为期两周的观测。设备以35°的角度，分别面向天空和白塔(图1左)进行观测。通过对比分析有无白塔时的缪子通量，科研团队推断出了白塔内部的平均密度结构。实验结果显示，白塔存在时，设备接收到的缪子数明显减少，这一减少比例与白塔内部的不透明度即平均密度长度相关，这一发现为揭示白塔内部结构提供了重要线索。

接下来，科研团队根据资料记载中的白塔尺寸进行物理建模(图1右)，并在模型中假设白塔内部是实心，平均密度为2.0g/cm³。通过模拟软件分析得到在此物理模型下缪子的通量，作为预期值与实际观测结果进行对比。

从图2左的密度结构成像图可以看出：缪子成像技术可将白塔的外形完整地勾勒出来。因塔尖顶部有较宽的铜制华盖，观测结果上也显示出了塔尖左右两侧平均密度高于预期的特征。塔身和塔基部分(图2左Ⅰ区)实际观测密度远小于预期密度2.0g/cm³，由此推断塔身与塔基部分接近空心结构，其内部应该存在一根或数根支撑木桩。塔肚外围周边(图2左Ⅱ区)实际密度要大于预期密度，显示其组成为密度大于2.0g/cm³的砖砌体，且砌体呈上厚下薄，内侧竖直，外侧有“倒升”，使得塔肚呈现肩丰足锐的形象。塔肚南侧(图2左Ⅲ区)有密度薄弱区，高度约2−3米，与图2右实际对比，可推测是由壶门式眼光门造成。白塔内部结构成像图的外围(图2左Ⅳ区)呈现明显的高密度区，经分析发现为白塔外面寺庙所引起。

这项实验的初步结果清晰地展示了缪子成像技术在不可移动文物研究中的可行性，验证了白塔主体结构，塔身和塔基为内部空心结构，塔肚处砖砌的平均密度高于2.0g/cm³。然而，要得到白塔内部更精细的结构以及结构性病害的探查，还需要进一步观测数据的积累以及智能大数据分析技术。下一步该团队将计划引入差分法和人工智能等算法确定白塔内部的更精细结构，并进一步通过更长时间的三维立体观测以获得大量的数据，解决白塔的内部结构三维精细成像以及灾病害的探查等关键问题。

欧洲历史文化遗产数字化举措概述

吕亚芳 胡文英

在数字化时代背景下，欧盟(EU)十分重视利用数字创新来保护和利用欧洲丰富的历史文化遗产。将数字技术融入历史文化遗产保护不仅被视为一种先进的遗产保护机制，也被视为一种增强欧洲人民文化认同感的重要手段。在欧盟采取的各项措施和行动计划中，最引人注目的是“Europeana”倡议、“时光机”(Time Machine)项目和“文化遗产合作云”(Collaborative Cloud for Cultural Heritage)计划。本文将对这些数字化举措从背景与目标、项目进展情况、面临的挑战与未来计划等方面进行概述性介绍。

“Europeana”倡议

该倡议于2008年由欧盟发起，旨在建立一个对欧洲文化遗产机构所藏数字资源的关联集成服务平台——Europeana，作为欧盟加强整个欧洲大陆历史文化遗产获取和利用的重要组成部分。

2008年11月20日上线的Europeana有三个主要功能：第一，访问欧洲历史文化遗产。在“连接欧洲基金”(CEF)的资助下，Europeana平台汇集了44个国家4000多个文化机构的数据资源，这些机构包括博物馆、美术馆、图书馆和档案馆等。公众能够通过该平台访问书籍、手稿、艺术品、照片和音像资料等大量数字化藏品。第二，创新许可和应用程序接口。Europeana平台采用开放式许可框架，为数字文化资源的搜索、保存和共享提供了便利。此外，该平台还提供强大的应用程序编程接口(API)，使开发人员、研究人员和教育工作者能够利用丰富的数字藏品创建新的应用程序和服务。第三，促进教育和创造性利用。Europeana平台通过提供一系列工具和资源，促进教育工作者、学生、研究人员和创意专业人员的学习和创意参与。

自成立以来，Europeana平台的数字藏品显著增加，从2008年可访问的450万件达到如今的6240多万件。这一扩展为欧洲文化遗产建立了一个重要的数字空间。此外，Eupopeana还建立了一个由文化机构、专业人士等组成的合作网络，促进了文化遗产数字化方面的合作、知识共享和创新，增强了平台的影响力和覆盖面。尽管取得了显著的成就，“Europeana”倡议仍然面临着资金、专业技术和可持续性等方面的挑战。未来的发展计划包括加强数字基础设施以改善用户体验和可访问性，整合人工智能和三维数字化等先进技术以提高技术能力，以及开发可持续的数字文化内容获取、保存和利用模式。通过这些举措，Europeana旨在巩固其作为欧洲历史文化遗产综合存储库的作用，并确保其在数字时代的持久影响力。

“时光机”项目

该项目于2016年启动，是欧盟委员会提出的一项创新研究计划。它旨在创建一个大型的历史模拟器，重现欧洲过去5000年的历史画卷。在欧盟委员会“地平线2020”研究与创新计划的资助下，170多家欧洲机构组成的联合体参与了这个项目，包括欧洲主要的博物馆、文化机构、数字技术和人工智能领域的专业公司。

“时光机”项目的核心目标是利用人工智能(AI)系统地收集、汇总和分析整个欧洲的文化遗产和历史数据。通过“相似性”识别和关联不同的文物、古迹和其他历史元素，该项目致力于创建一个复杂的计算机生成的模拟模型。该模型有望多维度地展现欧洲的历史、文化、经济和地理等方面，提供对欧洲历史新颖的解读方式与新的见解，从而丰富欧洲历史学术研究的叙事风格。“时光机”项目自实施以来，在历史数据数字化以及开发用于数据处理和模拟的先进算法和工具方面取得了长足的进步。这些技术进步在将历史数据集转换为动态、交互式三维模型方面发挥关键作用。该项目最初以威尼斯市为重点，现已扩展至阿姆斯特丹、巴黎、安特卫普和布达佩斯等城市。目前“时光机”项目已成功完成“地平线2020”研究与创新计划的第一阶段评估。

尽管取得了这些成就，“时光机”项目仍然面临着大规模数字计划所特有的重大挑战。这些挑战包括管理海量数据以有效实现数字化并将其整合到模拟模型中，以及解决与数据兼容相关的技术问题。此外，确保数据的历史准确性仍然是一项长期的学术挑战。展望未来，该项目计划进一步扩大其数字资源库，并改进其人工智能技术，以增强其模拟的互动性和精确性。此外，该项目还计划通过吸纳更多的机构参与以扩大其合作网络，从而为项目提供更多的数据和专业知识。随着“时光机”项目的持续推进，它有望通过在历史研究中创新性地使用数字技术，深刻改变人们对欧洲历史的理解。

“文化遗产合作云”计划

该计划由欧盟委员会于2019年发起，是欧盟为欧洲大陆不同文化遗产机构创建统一数字基础设施作出的一项努力。该计划旨在建立一个共同的合作平台，加强包括博物馆、图书馆、档案馆和美术馆在内的文化遗产机构之间的合作，以促进对欧洲历史文化遗产的研究和保护。

“文化遗产合作云”计划的核心目标是开发一个统一的数字平台，将欧盟各国的文化遗产机构和专业人员连接起来，为跨学科合作和联合研究提供一个强大的合作空间。该平台将提供安全的云存储和先进的数字工具，帮助文化遗产机构和研究人员开展联合项目并共享研究成果。此外，该计划的一个重要目的是促进包容性参与，特别是鼓励欧洲各地中小型博物馆的参与，包括那些交通不便的农村地区的博物馆。该计划通过促进联合研究和共同展览规划，旨在为欧洲各地中小型博物馆的数字化转型提供支持。

在“地平线欧洲”的资助下，“文化遗产合作云”计划自实施以来取得了初步进展，包括制定了初步的数字框架以满足不同机构的需求，以及通过研讨会和合作活动成功吸引了众多文化遗产专业人员和机构的参与，在欧洲建立了广泛的参与者网络。尽管取得了这些进展，“文化遗产合作云”计划的推进仍面临重大挑战。鉴于文化遗产类型的多样性和广泛用户群的不同需求，云基础设施的设计和开发将是一项非常复杂的工作。此外，出于对云存储的安全性、数字工具的可靠性以及向数字运营过渡的复杂性的担忧，一些文化遗产机构对采用云平台的信心和动力不足。为应对这些挑战，“文化遗产合作云”计划将不断强化其数字框架，确保更加方便用户且更加安全有效。该计划还将扩大服务范围，包括为数字保护和虚拟展览提供更先进的工具。为了增强用户的信心和参与度，该计划还将实施广泛的宣传和培训计划。通过采取这些措施，“文化遗产合作云”计划将有望极大地促进欧洲文化遗产机构之间的合作，对欧洲历史文化遗产的研究、保护和鉴赏产生深远影响。

“Europeana”倡议、“时光机”项目和“文化遗产合作云”计划等举措共同代表了欧盟对通过数字手段提高欧洲历史文化遗产的可访问性、保护性和互动性的承诺。这些举措虽然各有侧重，但目标都是整合欧洲各国分散的文化遗产数字化工作，创建全面统一的数字空间。这种具有凝聚力的方法极大地推进了欧洲历史文化遗产的数字化进程，为世界范围的文化遗产保护提供了启发。

(作者单位：中北大学人文社会科学学院 山西博物院)

稳步推进文物数字化 激发文物资源生命力

万菲

为使文物得到更加高效、永久的保护和传承，数字化技术已经成为文物资源保护利用的重要手段。数字化技术能够以非侵入和非接触的方式对文物本体进行高精度的数据记录、分析和重建，依托数字化技术能够更有效地保护、研究、展示和传播文物，让人类文明的瑰宝能够挣脱时空的束缚，生生不息的为更多人所了解和欣赏。

政府对文物数字化的支持

随着数字化技术在各行各业的应用，文物资源的数字化日益受到重视和关注。2018年国家文物局办公室印发的《关于加强可移动文物预防性保护和数字化保护利用工作的通知》中就对数字化保护工作的开展进行了明确界定，强调了要在文物保护与管理中与时俱进地应用现代信息技术以提升文物保存信息的完整性；《“十四五”文物保护和科技创新规划》的出台，第一次将文物领域的规划上升为国家级专项规划，明确提出要加强文物资源的数字化采集和展示利用；2023年十三部门联合印发的《关于加强文物科技创新的意见》更是结合文物领域科技发展的现状和趋势，明确了“突出重点、筑牢基础、以人为本、改革创新”的基本原则。《中华人民共和国文物保护法(修订草案)》亦包括加强文物保护数字化的内容。明确规定国家鼓励加强文物保护数字化工作，推进文物资源数字化采集和展示利用。

文物数字化技术的优势

文物数字化技术之所以日益被大家所认可，其中很重要的原因就是它不仅为文物保护提供了新的方式方法，一定程度上可以说是为文物提供了“第二次生命”，也为文物资源的展示、传承与发展开辟了新的维度。

数字化信息数据采集。通过高清拍摄和高精度的三维扫描技术可以完成对文物本体的全方位记录，将文物的形态、结构通过数字化的形式完整保存下来，在不直接接触本体的情况下探测到文物内部的结构缺陷、腐蚀情况和隐藏的损伤，从而避免了传统监测方式可能带来的文物信息的丢失或文物的损坏、变形问题。

数字化修复和重建。依托数字化的虚拟修复和精准建模对文物进行虚拟修复或重建，将复杂的文物修复问题转化为数字模型计算，提高了匹配效率和修复质量。并将复原后的效果以清晰、直观的方式呈现出来，同时也可以根据需要显现其部分细节和特点。

虚拟数字展示。借助VR、AR、360°全景漫游等各种数字技术，创造出逼真的文物展示场景，让观众身临其境感受文物的魅力，在互动中深入了解文物的历史、文化背景和制作工艺等信息，从而增强观众与文物的接触和共鸣。

文化普及大众化。数字化平台的搭建使公众可以不受时间、地点、财力、体力等条件限制，更加便捷地接触和了解文物资源，真正使文物资源成为公众的文化财富，进一步激发公众对文物资源的兴趣和保护意识。

信息资源共享。文物数字化数据库的构建，可以通过对文物的各项数据信息的统一管理、整合与维护，实现对文物信息的快速检索和资源共享，依托大数据对文物信息进行深入挖掘和分析，为文物研究和保护提供方便。

文物数字化面临的挑战

文物数字化的作用虽已被众多文博单位认可，国家也出台了一系列的政策措施予以支持，但不可否认文物数字化尚处于发展阶段，仍有许多不完善的地方需要改进。

数据安全存在隐患。利用数字化技术采集到大量的文物数据信息后，数据信息的存储、管理和安全保护成为一大难题。黑客入侵、病毒等可以通过非法途径入侵文物管理系统从而获取、篡改、删除珍贵的文物数据信息。内部工作人员、第三方合作人员的疏忽或故意行为可能造成文物数据信息的泄露。硬盘、服务器等物理存储设备损坏、云存储服务提供商的安全漏洞或服务中断等问题，都会造成存储数据信息的丢失。

数据信息利用不到位。很多文博单位对文物数字化信息采集的认识不到位，存在着“重采集轻利用”的思想，并未深入思考如何更好地将采集到的数据信息运用到文物的研究、保护、展示中。因此在投入了大量的人力、物力、财力采集到珍贵的文物数据信息后，便将存放数据信息的硬盘、服务器等设备束之高阁。

专业人才匮乏。数字化在文物管理中的应用与一般意义上数字化的内容有所不同，前者作为数字化领域中的一个特殊分支既要具有计算机、信息技术领域的专业知识，同时还需涉及历史学、考古学等多个领域的专业知识和技术。目前的情况看，兼具这些专业知识的“全才”凤毛麟角。为解决多学科人才缺乏的问题，往往采取各专业人才协同合作，根据专业明确清晰的划分各自负责的工作内容，从而制定一项完整的工作方案进行分工合作，但由于文物类型存在多样化的特点，一旦分工出现偏差，就极有可能影响最终的数字化结果，致使整个项目的失败。

经费投入不足。众所周知，没有大量资金的投入，文物数字化工作将寸步难行。具体表现在：一方面，文博单位若要独立持续性的完成文物数字化工作，需要购置先进且昂贵的设备，如高精度的扫描仪、专业的摄影器材以及强大的数据存储设备等硬件设施，若资金短缺可能导致无法购置或更新这些必要的硬件设施，从而直接影响数字化工作的质量和效率。同时专业的应用软件对文物数字化来说也是必不可少的，但购买正版软件往往是一笔不小的开支，若是因“囊中羞涩”而购买了盗版软件或无法及时进行软件更新，不仅存在法律风险，还可能影响数字化成果的质量和兼容性。另一方面，很多文物数字化项目都是一个系统性的工程，项目周期具有延续性且时间跨度大，若是缺乏持续且充足的资金投入，则只能选择少量文物进行数字化，大量文物无法得到及时有效的数字化采集，更有甚者一些文物数字化项目可能被迫推迟或取消，进而影响文物信息采集、保护和利用的整体进度。

化解文物数字化的难题

虽然现阶段文物数字化面临来自资金、技术、人才等方面的挑战，但只要做好充足的准备、完善应对措施，文物数字化应用充满了无限可能和令人振奋的前景。

加大资金投入。其一，财政支持当然还是重要的资金来源之一，政府在制定年度财政预算时可以根据文物数字化的资金预期，明确划分出用于文物数字化工作资金预算，专款专用。通过设立文物数字化发展专项基金，对重点、有发展前景的文物数字化项目进行全额或部分资助。其二，通过媒体、网络等渠道广泛宣传文物数字化的重要性和意义，从而吸引更多企业、社会资本投入文物数字化领域，并对参与其中的企业适当给予一定的政策扶持。其三，文博单位应解放思想，在政策允许的情况下依托自身拥有的文物资源特殊性这一优势，与企业合作研发满足市场需求、群众接受度高的文创产品，以增加用于文物数字化的收入来源。

加强技术研发与创新。第一，构建一个融合高校的理论研究、科研机构的技术探索和企业的生产实践为一体的产学研相结合的发展模式。这种发展模式下产出的技术，在具有理论依据和技术革新的同时能够拥有第一手市场反馈，真正让技术能有用武之地。第二，依托需求导向的倒逼机制，研发机构、科研公司可以与文博单位建立联络机制，定期收集文博单位对数字化方面的实际需求及技术设备的使用反馈，从而根据需求有的放矢地研发、更新出符合应用实际的技术设备。第三，鼓励在校相关专业的学生和文博单位的从业人员参与到文物数字化技术的研发和更新中，政府和相关企业、机构可以通过设立专项基金，为做出贡献的个人或部门给予经济、物质奖励。

保障数据安全。首先，相关部门应制定、完善关于文物数字化数据安全方面的法律法规，明确数据所有者、管理者、使用者、参与者的权利和义务，以及违法违规行为的处罚标准。其次，项目开始前与所有参与文物数字化项目的人员，不论是内部还是第三方机构的工作人员，签订具有法律效力的保密协议和安全责任书，明确相关责任界定。其三，定期开展数据安全的相关培训，提高工作人员的安全意识和技术水平。建立监督和举报机制，一旦发现违法违规行为立即严肃处理。最后，人防不如技防。采用先进的加密技术对文物数字化数据进行加密处理，确保数据在传输和存储过程中的安全性。定期更换密码或更新加密技术，以应对不断升级的安全威胁。

培养复合型人才。一方面，高校应当加强文物数字化相关专业或课程的设计，融合相关学科内容进行跨学科合作，制定完善的培养计划和课程设置。鼓励高校学生在校期间积极参加文博单位的数字化项目实践，在实践中查缺补漏不断提升理论和实践能力。另一方面，针对文博单位在职文物管理人员，聘请文物数字化方面优秀项目的负责人、专家组织专题讲座、研讨会、实地考察等活动；同时定期开展数字化技术的职业培训，提升其技术应用能力和数字化管理水平。

随着文物数字化技术的不断创新发展，数字化应用的意义将不再简单定义为能够全面、细致地记录文物的各种数据、特征，将文物信息永久性地备份保存下来。“不断提高”的技术水平和人员素质，让文物在数字化的加持下拥有源源不断的发展活力。“不断清晰”的三维扫描和无损检测技术等数字化保护手段，让模糊的细节、深藏的缺陷毫无保留地呈现从而得到精准的修复；“不断增强”的AR、VR、3D投影等数字化展示手段让文物不再是静止的艺术瑰宝，让普通观众都能近距离、全方位感受瑰丽灿烂的历史文化。文物在与数字技术的交织碰撞中迸发出新活力与新机遇，将展现出无限魅力与广阔前景。

(作者单位：山东省文物考古研究院)