
大雁塔究竟“长”什么样？这个科研团队首次看清

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39709.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

大雁塔究竟“长”什么样？这个科研团队首次看清

。矗立千年的西安大雁塔，是唐代建筑的璀璨瑰宝，更是华夏文明的鲜活载体。然而千百年来，这座砖石古塔的内部结构始终蒙着一层神秘的面纱，其“骨骼”究竟如何构成、隐藏着哪些岁月留下的损伤，一直是文物保护与考古研究领域的待解之谜。

近日，由西安建筑科技大学科研团队完成的“大雁塔结构探测与稳定性评估项目”正式通过验收。该团队借助空天地一体化探测技术与人工智能手段，对大雁塔进行了全方位“体检”，不仅首次精准揭示其多层级复合结构的“骨骼”真相，更量化了隐蔽损伤、剖析了病害成因，开创了文物建筑数智化保护的新模式，为这座千年古塔的永续传承筑牢了科技根基。



大雁塔。摄影 杜鹃

首次看清大雁塔“骨骼”构造

大雁塔究竟“长”什么样？此前，这座建于唐代的著名砖塔，内部结构形态始终是一个待解之谜。西安建筑科技大学团队运用三维激光扫描与电磁谐振探测技术，首次精准揭示大雁塔为“夯土核心—唐代砖砌体—明代加固砖层—木柱支撑”的多层级复合结构。

“就像一棵古树有年轮一样，大雁塔的每一层结构都记录着华夏文明不同的历史时期。”项目负责人苗元耀介绍，这一发现让研究团队首次看清了古塔的“骨骼”构造。

更令人关注的，是大雁塔内部构造的细微之处。研究团队通过可视化探测技术精准捕捉到，唐代原砌砖体与明代补砌砖体之间，不仅存在清晰的空间分布规律，更有明确可辨的交接界面，清晰勾勒出不同历史时期的修缮痕迹。尤为关键的是，探测首次精准测得，明代塔檐与唐代塔檐之间存在平均50毫米的空隙带——这一重要的结构分离现象，在此前的研究中从未被准确测量，也未留下任何相关记录，填补了大雁塔结构认知的空白。

看不见的地方，往往藏着最大的危险。团队运用多种探测手段，精准定位了塔体内部的隐蔽损伤情况：利用电磁谐振探测技术等手段，量化了损伤的尺寸、位置等关键参数；明确了塔檐损伤高度集中于新旧补砌牺牲层材料交接处，这一区域成为结构最薄弱的环节。这些发现，为后续的针对性修复提供了精确“靶点”。

大雁塔为何会“生病”？团队从材料劣化角度分析大雁塔的病害成因是由环境侵蚀、化学破坏、物理荷载及极端地质风险共同作用的系统性结果。

西安建筑科技大学工程结构耐久性与全寿命领军教授团队，通过模拟西安气候环境的长期试验，证实了水分迁移呈现“下高上低、外高内低”的规律，塔基长期处于高湿状态，在盐冻耦合作用下，砖体孔隙率增加3倍，抗压强度下降约40%，水线变动区域干湿交替，成为全塔表观损伤的最高风险区。而盐害是表层破坏的主导因素，团队在表面粉化区域检测到硝酸根浓度达2.9%、硫酸根离子达2.4%，这些盐分结晶后引发砌体剥落和灰缝流失，塔身盐析泛碱病害局部显著——这意味着，大雁塔表面的“白色伤疤”多源于此。

数值模拟表明，登塔游客与交通振动等形成荷载会产生耦合效应。耦合工况下，底部券洞及塔檐易出现累积疲劳损伤。此外，地震风险同样令人警醒。基于离散元模拟，团队还原了罕遇地震下塔体损伤的6阶段演化过程；当塔体倾斜 0.9° 时，中上部压应力增加43.5%，损伤速度显著加快。

传统文保引入人工智能

“给大雁塔做CT，需要调动天上的卫星、地面的无人机和地面的探测仪。”团队构建了空天地一体化探测网络：使用PS-InSAR卫星遥感，实现年均沉降1.98毫米的毫米级监测；而无人机倾斜摄影，使得三维建模精度达到厘米级；研发的电磁谐振法则成为深层结构探测的“透视眼”。综合应用下，裂缝定位精度达90%，让隐蔽损伤无所遁形。

人工智能的引入，也让传统文保工作焕发新生。团队开发了多款智能系统：利用VMamba神经网络+双向图扫描算法精准分割复杂裂缝形态；双注意力Transformer模型提升损伤识别的准确率；CNN目标检测系统则能实现7类表观病害自动识别。

“过去靠人工肉眼排查几天的工作量，现在AI系统几小时就能完成。”团队成员董振平表示。

此外，从宏观到微观，团队建立了完整的数字仿真体系。

在土—结构—交通荷载耦合有限元模型经原位动力测试验证后，误差控制在7.7%以内，离散元模拟能真实再现地震损伤全过程，多尺度分析为预防性保护提供全链条决策依据。

这套“数字孪生”系统，让科研人员可以在虚拟空间中反复试验，找到最优保护策略。



大雁塔结构探测与安全评估项目验收会。西安建筑科技大学供图

从“被动抢救”到“主动预防”

基于全面“体检”结果，团队提出三级保护建议：全域监测整体沉降变形、局部监测重点部位位移、微观监测盐分和湿度等实时预警。在此基础上，可采取塔檐交接面空隙带、一层内部空洞、盐害区域等靶向修复工程。同时，通过优化交通运行频次，降低周期性振动，执行登塔客流限流，减少振动对古塔的损伤。

“历时一年、4册技术报告，项目突破了传统砖石古塔探测精度低、评估方法单一的技术瓶颈，形成系统性的研究成果与保护建议。”苗元耀表示。

本次评估项目填补了大雁塔结构形制认知的多项空白：首次揭示多层复合结构、量化盐蚀—冻融耦合损伤、构建了无损探测与稳定性评估技术体系。更重要的是，项目开创了“数智化诊断—防治—预防”的文物建筑保护新模式。

验收专家组成员、同济大学研究员张瑞甫表示，“大雁塔结构探测与稳定性评估成果以先进技术掌握古塔结构状态，为唐代砖石古塔保护夯实了科学基础、提供了工程参考，推动古建筑结构保护迈向数字化、精细化、预防性保护新路径，对全国同类文物建筑安全保障具有重要示范意义，实现从‘被动抢救’到‘主动预防’的转变。”

作者：李媛,王俊 来源：中国科学报

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发