

基于 AI+BIM 的 3D 打印工业遗产修复技术研究——以苏州西山发电厂为例

权书琦 陈思含 叶思媛 韦芳*

苏州工学院商学院

DOI:10.32629/bd.v9i9.4478

[摘要] 以苏州西山发电厂修复为例,探索AI+BIM与3D打印技术在工业遗产修复中的协同路径。针对结构安全与形态还原冲突、异形构件复原精度不足及数字化资料缺失等问题,构建了基于力学模拟与分段打印的结构优化方法,并形成全流程数字溯源体系。研究表明,该技术路径有效提升了修复精度与实施效率,为工业遗产保护提供了可推广的技术框架。

[关键词] 3D打印; AI+BIM技术; 工业遗产; 建筑修复

中图分类号: F287.2 文献标识码: A

Research on 3D Printing Technology for Industrial Heritage Restoration Based on AI+BIM: A Case Study of Suzhou Xishan Power Plant

Shuqi Quan Sihan Chen Siyuan Ye Fang Wei*

School of Business, Suzhou Institute of Technology

[Abstract] Taking the restoration of the Suzhou Xishan Power Plant as a case study, this research explores the collaborative pathway between AI+BIM and 3D printing technologies in the restoration of industrial heritage. Addressing critical challenges—such as the conflict between structural safety and morphological restoration, insufficient precision in recovering irregular components, and the lack of digital documentation—this study constructs a structural optimization method based on mechanical simulation and segmented printing, establishing a full-process digital traceability system. The results indicate that this technological approach effectively enhances restoration precision and implementation efficiency, providing a scalable technical framework for the protection of industrial heritage.

[Key words] 3D printing; AI+BIM technology; industrial heritage; architectural restoration

1 引言

1.1 工业遗产修复的时代意义

工业遗产作为工业文明的物质载体,其修复意义不仅关乎历史的存续,更在于对技术演进脉络的真实记录。西山发电厂作为长三角早期电力工业的典型遗存,其结构与空间形态完整体现了民国工业建筑的特征。在当前时代下,工业遗产修复已超越传统文物保护的单一维度,演变为融合历史价值与活化利用的综合实践。以功能的适应性转型为关键利用模式,且以多元主体的协同治理为制度创新的重要支撑,从而形成了从价值传承到功能再造的路径,这正是新时代工业遗产保护的核心需要。^[1]

1.2 传统修复技术的局限性

传统工业遗产修复多依赖图纸,在面对西山发电厂这类具

有复杂空间形态的工业建筑时,其瓶颈尤为突出。首先,人工量测的图纸难以完整记录异形构件的几何特征,导致修复构件与原结构存在偏差;其次,传统工艺对历史材料的劣化评估缺乏准确依据,常出现“过度修复”或“修复不足”的现象;再者,修复过程多依赖纸质文档,信息呈碎片化,使得修复过程中的技术决策难以全程追溯。

1.3 AI+BIM与3D打印技术的发展现状

AI+BIM作为工业遗产数字化修复的核心技术,在结构力学模拟、精细建模、缺失构件数字化补全等方面展现出优势,实现了工业遗产修复设计的精准化与数字化,为后续实体修复奠定了高精度的数据基础。

3D打印技术在建筑领域已从概念走向实际应用,凭借其无模化与精细化的制造优势,实现了复杂异形构件的精准智造。沙

特阿拉伯积极引入3D打印技术,已成功落地3D打印别墅和清真寺,并与中国合作推进装配式建筑发展。^[2]

二者融合成为建筑智能建造的发展趋势,在异形建筑施工领域已有初步实践,但针对工业遗产修复的专项融合路径与实操方案仍处于探索阶段,尚未形成适配工业遗产砖混-钢结构体系、非标异形构件修复的成熟技术模式,这也为本次研究提供了实践与探索的空间。

2 苏州西山发电厂修复难点分析

2.1 结构安全与形态还原的矛盾

常规的修复手段多依赖人工经验,通过增厚构件截面、引入异质支撑体系或大面积更换材料来实现结构加固。这种“增量式”干预在一定程度上保障了结构的稳定性,却容易导致建筑比例失调与时代痕迹被掩盖。相反,若过度追求视觉层面的形态复原,则可能因忽视材料性能退化及复杂的内力重分布而埋下安全隐患。

2.2 异形构件复原难题

西山发电厂现存大量非标异形工业构件,其独特几何形态与手工铸造肌理是工业遗产的重要物质载体。但自然侵蚀与人为破坏导致完整样本稀缺、原始图纸缺失,给修复带来挑战。当前AI+BIM技术虽能实现高精度数字化建模,却难以复原传统工艺:模具浇筑无法适配复杂曲面且定制模具成本高、周期长,难以兼顾修复精度与效率。

2.3 数字化记录缺失

该厂建于1959年,原始图纸已佚失,传统的局部勘测记录与实际偏差显著,导致修复方案缺乏可靠的数据支撑。数字化信息的空白,不仅意味着历史真实性的消解,更将直接导致保护决策失去科学依据。

3 AI+BIM与3D打印融合路径探索

AI+BIM与3D打印的融合,是数字孪生与智能建造理念在工业遗产修复中的深度实践。该架构以BIM为数字容器集成遗产信息,以AI为决策智能引擎,二者共同构成修复方案的“数字大脑”;3D打印则作为转化媒介,将模型精准地转化为物理构件。三者协同作用,形成“数字建模—智能优化—精准智造”的全流程闭环,推动工业遗产修复从经验主导向数据驱动跨越。

3.1 AI+BIM技术概述

AI+BIM技术将人工智能算法嵌入建筑信息模型中,高质量数据是智能建造得以实施的基础,通过AI的机器学习与视觉能力,赋能BIM从静态模型向智能数字生态的升级。^[3]以BIM构建标准化数字载体,借助AI进行智能分析与模型重构,从而使工业遗产能够完成自动化逆向重构与模型修复,将经验型修复转化为数据驱动的精准决策,为建筑构建全生命周期的数字档案。

3.2 3D打印技术适配性分析

3D打印,是一种基于三维数字模型,通过材料逐层叠加方式直接生成物理实体的先进制造方法。^[4]针对遗产修复的特殊需求,3D打印技术展现出多种适配优势:在材料适配层面,研发的特殊材料有效改善层间粘结强度,其主要性能可与历史混凝土

构件实现性能匹配,保障了整体性。此外,3D打印的无模化制造,避免了对历史建筑本体的传统模板支护扰动,为精细化、低干预修复提供了理想路径。

3.3 三者融合的技术逻辑与流程设计

AI+BIM与3D打印技术的融合,是以AI+BIM为数字核心,3D打印为实体转化载体,实现工业遗产修复从“数字化精准设计”到“智能化精细建造”的无缝衔接,构建“设计-建模-智造-施工-溯源”的全流程智能修复体系,核心流程分为数据预处理、工艺优化、精准智造、施工落地、数字溯源五个阶段。

4 苏州西山发电厂修复实践

4.1 基于结构安全的形态优化设计

以苏州西山发电厂输煤廊道中的梁为例,可利用AI+BIM驱动的3D打印技术展开优化设计。

4.1.1 基于AI+BIM技术的3D打印模型转化

完成梁构件测绘与BIM建模后,基于AI力学模拟技术解析其应力分布与变形趋势。基于模拟结果的反馈,对模型进行差异化设计:在高应力区实施局部加筋或截面重构,在低应力区进行轻量化处理。同时,针对打印工艺需求对构件进行分段设计,优化壁厚与曲面连续性,完成面向3D打印的切片处理,将结构优化结果精确转译为可执行的路径数据。

4.1.2 基于形态与受力特征的打印材料选择

根据梁构件的结构特征、服役环境与AI模拟结果,选用高性能纤维增强混凝土作为主体3D打印材料,以确保构件的初凝性能与长期耐久性。同时在关键受力区域同步嵌入碳纤维增强筋材,通过材料层面的复合设计,提升梁结构的韧性与抗裂能力。

4.1.3 复杂梁构件的分段化预制打印

受限于输煤廊道内部作业空间及构件尺度,整体打印难以在现场实施。本研究采用“工厂预制、现场拼装”的技术路线,在打印过程中,在分段构件端部预留螺栓孔、榫槽等机械连接节点,为后续装配提供结构基础。

4.1.4 精准分层成型与新旧构件协同受力

3D打印的成形质量与力学响应高度依赖于切片及路径规划策略。^[5]针对原构件中存在的非规则曲面或局部特征,结合AI力学分析结果,在加固构件的高应力集中区域动态调整打印层厚与材料密实度,采用外包覆形式与原梁紧密结合,通过良好的几何匹配与力学协同作用,在显著提升结构承载能力的前提下,实现了历史风貌的最小干预与精准延续。

4.2 异形构件精细化制造流程

针对苏州西山发电厂烟囱装饰构件、非标金属楼梯扶手、工业风格门窗扇等异形构件,构建基于AI+BIM与3D打印的精细化制造流程,统筹技术适配与文化协调,避免因偏差破坏构件精度或文化表征,实现从数字化建模到实体构件智造的精准落地。^[6]

4.2.1 高精度数字化建模

基于AI+BIM逆向建模,对残片三维扫描与特征识别,通过AI推演比对补全缺失部分,生成亚毫米级精度的BIM构件模型。

4.2.2 3D打印方案设计

AI结合BIM模型及构件材质、形态需求,定制3D打印方案:烟卤陶瓷构件采用“光固化树脂初模+陶瓷注浆”工艺,保障纹理与材质匹配;金属构件采用金属粉末激光烧结工艺,还原肌理与接口;砖混装饰砖采用混凝土挤出工艺,匹配原有材质强度。

4.2.3 精细化智造与质量检测

将优化模型导入3D打印设备实时监控比对,AI修正偏差。打印成型后进行三维扫描检测,AI分析超标部位并二次修复,确保实体与模型一致。

4.2.4 构件预处理与现场适配

对合格构件进行表面预处理,金属构件防锈、陶瓷构件釉面修复、混凝土构件肌理做旧,贴合建筑历史风貌。利用BIM空间定位功能开展现场预拼接,AI根据数据微调接口,确保安装精准、无缝衔接。

4.3 数字溯源系统构建

建成基于区块链的数字溯源体系,将3D打印构件的全周期信息(如设计参数、材料批次、生产日志、安装位置、验收记录)上链存证,实现从构件生产到现场施工的全过程动态管控。^[7]

(1)设计端:AI生成的BIM模型参数、优化方案、3D打印路径规划等信息,作为溯源起点。(2)生产端:打印机的运行日志、材料消耗记录、质量检测报告等数据实时上传。(3)施工端:构件运输、吊装、安装等环节的关键信息,通过移动终端扫码录入。(4)运维端:构件后续的维护、检修、更换记录,持续补充至溯源链条。

5 结论与展望

5.1 总结

本文以苏州西山发电厂保护修复工程为研究对象,针对工业遗产在结构加固、异形构件还原及数字化管控方面的现实困境,系统提出了“AI+BIM驱动的3D打印技术”的集成应用,不仅为苏州西山发电厂提供了可行的修复方案,也为同类工业遗产的数字化修复提供了理论参考与技术范式。

5.1.1 构建了数据驱动的修复设计决策体系

研究证实,通过BIM集成三维扫描数据,结合AI算法进行力学仿真与优化,有效解决了过度干预问题,实现了从几何还原到性能优化的跨越,确保修复方案兼顾原真性与安全性。

5.1.2 验证了3D打印在工业构件高保真制造中的适用性

优化的打印技术可降低孔隙率,从而提升密实度与强度。^[8]针对西山发电厂特有的工业细部及复杂异形加固件,3D打印的无模化制造优势突破了传统工艺精度与复杂形态难以兼顾的瓶颈,实现了高精度、低扰动、可逆性的协同统一。

5.1.3 形成了全寿命周期的数字化管理闭环

基于数字溯源系统,实现了3D打印构件全过程监测,解决了

运维阶段的信息断层,为预防性保护与智能化运维提供了数据底座。

5.2 未来研究方向

尽管本研究验证了技术路径的可行性,但受限于实验条件,未来仍可从以下方面深化:

(1)材料相容性:开展3D打印材料与既有材料在复杂气候下的化学相容性及长期耐久性实验。(2)施工智能化:提升现场机器人与BIM模型的实时交互精度,减少人工干预。(3)标准体系:结合更多案例形成工业遗产智能建造技术评价指标,推动规模化应用。

[基金项目]

2025年度苏州工学院大学生创新创业训练计划项目“工业遗产智能再生:AI-3D打印修复技术的开发与应用研究”,项目编号: X202510333284。

[参考文献]

[1]丁鹏,张美娟,奚小网,等.苏南地区机械工业历史遗存的代价值与利用研究——中国工业遗产的区域性案例与全国性意义[J].建筑与文化,2025,(10):226-228.

[2]李贝,李健康,李峰,等.3D打印在沙特阿拉伯装配式建筑中的应用综述[J].建筑技术,2025,56(S1):53-55.

[3]杨波.基于数据治理的AI与BIM融合技术在机场智能建造中的应用研究[J].土木工程信息,2025,17(05):98-103.

[4]王海燕.3D打印技术在工程建筑领域的应用及展望[J].江西建材,2022(8):5-8.

[5]李勇,曾治国,刘维,等.3D打印技术在混凝土建筑工程中的应用[J].四川水泥,2024,(05):22-24.

[6]左金仙.3D打印技术在复杂装饰构件施工中的实践探索[A].新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题(第三册)[C].《中国招标》期刊有限公司,2025:211-215.

[7]文博.基于BIM的绿色建筑施工流程优化路径探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(01):41-43.

[8]苏恒宇,姚文杰,刘梦溪.3D打印井壁混凝土各向异性物理力学行为研究[J].混凝土,2025,(11):151-155+162.

作者简介:

权书琦(2006--),男,汉族,江苏徐州人,苏州工学院本科工程管理在读学生,研究方向:建筑修复。

*通讯作者:

韦芳(1979--),女,汉族,江苏常熟人,苏州工学院商学院副教授、全国一级注册建造师、造价工程师、监理工程师,主要从事智能建造、工程造价研究。