

城市更新背景下沉管隧道大修施工技术管理实践

杨 臻

上海隧道工程有限公司大盾构工程分公司，上海

收稿日期：2025年7月12日；录用日期：2025年8月2日；发布日期：2025年8月14日

摘 要

在城市更新战略背景下，沉管隧道大修工程面临动态水环境、受限空间作业及多目标协同等复杂挑战。本研究以上海外环隧道大修工程为实践案例，通过技术创新与管理优化，构建了“技术集成 - 管理创新 - 数字赋能”三位一体的解决方案。关键技术包括沉管接头三向位移自动化监测、零化环保激光除锈、高压水射流精准拆除及智慧工地平台集成应用，实现了结构安全毫米级监测、拆除效率提升400%、建筑废料综合利用率92%等显著成效。为城市基础设施更新提供了可复制的技术范式与管理经验，对推动工程建设领域高质量发展具有重要实践价值。

关键词

城市更新，沉管隧道大修，自动化监测，智慧工地，资源循环，施工管理

Construction Technology Management Practice for Immersed Tunnel Rehabilitation in the Context of Urban Renewal

Zhen Yang

Large Tunnel Engineering Branch, Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 2nd, 2025; published: Aug. 14th, 2025

Abstract

Under the strategic background of urban renewal, immersed tunnel rehabilitation projects face

complex challenges including dynamic aquatic environments, confined space operations, and multi-objective coordination. Taking the rehabilitation project of Shanghai Outer Ring Tunnel as a case study, this research develops an integrated solution combining “technological innovation, management optimization, and digital empowerment”. Key technologies include automated three-dimensional displacement monitoring of tunnel joints, zero-pollution laser rust removal, precision demolition using ultra-high-pressure water jet technology, and the application of an intelligent construction management platform. These innovations have achieved remarkable results: millimeter-level structural safety monitoring, 400% improvement in demolition efficiency, and 92% comprehensive utilization rate of construction waste. The study provides replicable technical paradigms and management experience for urban infrastructure renewal, offering significant practical value for promoting high-quality development in the engineering construction sector.

Keywords

Urban Renewal, Immersed Tunnel Rehabilitation, Automated Monitoring, Smart Construction Site, Resource Recycling, Construction Management

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景与技术管理挑战

1.1. 研究背景与战略意义

新型城镇化背景下，城市更新战略对基础设施迭代升级提出刚性需求。作为城市交通网络的核心节点，沉管隧道在长期服役过程中面临结构老化、功能衰减等突出问题，其大修工程成为延续城市生命线韧性的关键举措。尤其在长三角等高密度城市群，既有隧道的通行能力衰退与空间承载力不足的矛盾日益凸显，亟需通过系统性修复与功能提升破解城市交通瓶颈，重构地下空间与城市发展的动态平衡。

沉管隧道大修工程的特殊性在于多重复杂环境叠加下的技术与管理挑战。动态水环境引发的周期性荷载作用加剧了结构安全监测与风险预判的难度；大规模拆除作业产生的建筑废料与隧道内部受限空间的施工约束，则要求突破传统工程思维，探索资源循环利用与低影响施工的协同路径。与此同时，城市更新背景下的工程实施需兼顾交通疏解、环境保护与社区和谐等多重目标，施工过程中扬尘、噪音等环境指标的严苛管控，进一步凸显了精细化管理的必要性。

在此背景下，施工管理创新成为平衡工程效能与城市运行的关键突破点。通过技术路径优化与管理机制重构，既可提升修复工艺的可靠性与资源利用效率，又能降低施工活动对城市正常运转的干扰，为同类城市更新工程提供可复制的技术范式与管理经验。这一探索不仅关乎基础设施本身的功能再生，更为后续章节将阐述的技术创新和管理实践提供了现实基础。

1.2. 工程概况

外环隧道是上海首座采用沉管法施工的特大型越江隧道，项目西起浦西 G1503 同济路立交，向东穿越黄浦江，终点止于浦东三岔港与 G1503 北段道路相接处。外环隧道采用双向八车道、三孔两管廊横断面布置形式，其中沉管段由 7 节管节(E1~E7)组成，管节间设置 GINA 和 OMEGA 两道止水带止水。隧道自 1999 年 12 月开始施工，2003 年 6 月建成通车。

隧道通车至今，交通量快速增长，其中 2021 年日均通行量达 8.1 万辆次，2022 年沿江通道浦西接线

段主线通车后,部分流量分流至郊环隧道,隧道通行量有所降低,日均通行量约 6.5 万辆次;2023 通行量回升,日均通行量约 7.3 万辆次,其中大型货车(含集卡)占流量的 80%左右,是上海北部地区联通黄浦江两岸的重要交通设施。

1.3. 外环隧道大修的约束与特殊性分析

沉管隧道大修工程作为城市更新的特殊场景,其复杂性源于自然、技术与社会的多重约束耦合,主要体现在以下三个维度的挑战:

1) 动态水环境下的结构安全挑战

潮汐涨落与管节结构姿态的交互影响,导致管节接缝处产生周期性位移变化,传统的人工监测手段难以满足毫米级精度要求。

2) 受限空间内的资源循环挑战

隧道内部作业空间受限,建筑废料的运输、分拣和处置面临严重制约。传统线性施工模式下的资源消耗与环境污染问题在封闭环境中被进一步放大,亟需构建适应受限空间特性的资源循环利用体系。

3) 城市更新背景下的多目标协同挑战

施工活动需要统筹兼顾交通组织、环境保护与社区和谐等多重目标。扬尘、噪音等环境指标的严苛管控标准,以及周边居民对施工干扰的敏感反应,都对施工组织提出了精细化、智慧化的新要求。

这三重挑战的相互交织与叠加,使得沉管隧道大修工程呈现出显著区别于常规基建项目的复杂性特征,亟需建立与之相适应的系统性解决方案,这正是下文技术体系创新的出发点。

2. 关键技术环节与管理对策

2.1. 沉管接头修复加固施工管理

1) 沉管接头三向位移自动化监测

技术应用:使用自动化监测设备用于精确测量隧道结构的三维位移,包括纵向位移(沿隧道轴线的位移)、横向位移(垂直于隧道轴线的水平位移)和竖向位移(垂直方向的位移)。

技术优势:自动化监测对于评估隧道结构的稳定性,及时识别异常变化,防范潜在风险至关重要。通过位移监测,可以发现隧道在施工过程中可能出现的变形、错位等结构问题,确保其长期稳定和安全。

技术评价:以高精度的自动化监测设备,数据实时传输至智慧工地技术平台,旨在提高施工的精确度、效率和安全[1]。

2) 零化环保激光除锈技术

技术应用:采用非接触式激光清洗设备,精准清除钢剪切键、OMEGA 止水带压板等接头钢结构的锈蚀,避免化学试剂使用。

环保优势:无化学废液/废气,通过除尘设备收集锈蚀颗粒,减少粉尘污染;低能耗(表面温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$),保护基体金属,延长结构寿命。

效率提升:操作自动化,清洗效率高,可贴合曲面作业,劳动强度低;

技术评价:以高能激光精准剥离锈蚀,减少人工打磨产生的灰尘,降低对原 Omega 止水带损坏。钢结构激光除锈设备外观如图 1,除锈效果如图 2。

2.2. 原有设施拆除技术管理

1) 精确分层铣刨与骨料再生技术

技术应用:使用铣刨机替代传统镐头机,分层铣刨凿除铺装层约 1.87 万立方米。

环保优势：震动可控，减少对沉管隧道的扰动；铣刨碎屑 80%~95%再生为骨料，用于路基填充或新混凝土制备。

效率提升：铣刨完成后可根据现场计划随时出料，能耗较传统设备降低 20%~30%；

技术评价：以低扰动、高再生技术，精细化分层拆除，显著减少建筑垃圾。混凝土铺装层铣刨设备如图 3。



Figure 1. Laser rust removal equipment for steel structures
图 1. 钢结构激光除锈设备



Figure 2. Laser rust removal effect on steel structures
图 2. 钢结构激光除锈效果



Figure 3. Concrete pavement milling equipment

图 3. 混凝土铺装层铣刨设备

2) 超高压水射流精准剥除技术

技术应用：利用高压水射流选择性破除防撞墙混凝土，保留钢筋完整性。

环保优势：无振动、无粉尘、低噪音(仅使用清水)；破碎混凝土无钢筋混杂，可直接回收为再生骨料。

效率提升：单日破除量达 80 米(传统镐头机仅 20 米)，效率提升 4 倍；

技术评价：开创无尘、无震、无废的绿色拆除新模式[2]；高压水射流机器人外观如图 4。



Figure 4. High-pressure waterjet robot

图 4. 高压水射流机器人

2.3. 智慧化施工管理平台应用

智慧化施工管理平台将通过数据监测、视频监控、三维模型和受力分析以及智慧工地等先进技术手段，旨在提高施工的精确度、效率和安全性。通过实时数据监测，可以及时发现和解决潜在问题，减少事故风险；视频监控能够全方位掌握施工现场动态，确保施工过程的规范性和安全性；三维模型和受力分析为施工提供科学依据，辅助优化施工方案，提升工程质量；智慧工地则通过智能化管理手段，实现资源的高效配置和施工进度精细化管理。这些技术的综合应用不仅有助于提升施工质量和效率，还

能有效降低施工成本和风险,保障工程的顺利进行和人员的安全,为实现工程的现代化、智能化提供坚实的基础。

通过不同系统的集成使用完成智慧工地建设,所含系统如下:

1) 网络保障系统

将采用先进的物联网技术,包括信息采集层、网络接入层、网络传输层、信息存储与处理层等;保证工地现场视频数据、人员实名制考勤数据、人员安全数据、扬尘噪音监测数据实时上传给中心管理平台[3]。

2) 视频监控系统

施工监控覆盖范围包括但不限于出入口大门、材料堆放场地、危险源周边、重点消防部位等;项经部专门设立监控室,配备监控专用屏幕,所有监控均可以调取观看,方便值班人员及时发现现场隐患并进行处理。

3) 实名制系统

人员信息采用集中导表配合自动化采集方式(身份证识别器、人像采集摄像头等)进行录入,包括人员基本信息、资质证件、允许进场时间段等。

4) 智能门禁系统

采用“劳务实名制系统+人脸闸机”模式,通过采集和传输出勤人员的记录,班次、时间、工种和人员信息,展示当日出勤信息,特种作业人员出勤信息、当日在场人数各个单位,各个分包单位出勤人数。

通过以上系统分别实现不同的智慧化施工管理平台应用点如下:

1) 班前教育管理

班前教育情况由安全员或者班组长通过移动端上传,根据施工计划,班组长或者安全员召开班前教育;通过施工班前教育,可以有效地降低施工事故的发生率和损失程度,保障施工人员和设备的安全。同时还能提高工人的技术水平和操作能力,优化施工进度和效果。

2) 现场巡查管理

监理将现场不规范问题上报至平台,项经部整改资料上传,经监理审核后完成闭合;视频告警信息,如视频中断、录像中断等告警,项经部整改后总监审核;城投鹰眼推送过来的问题整改,总监审核后,需建设单位负责人复核问题确认。

3) 关键岗位考勤

施工单位关键岗位包括项目经理、项目副经理、安全主管以及安全员等,通过移动端或者闸机识别考勤,不同岗位人员考勤范围以及考勤间隔时间不同;移动端设置请假、审批流程,平台上申请后反馈到业主、监理处。

4) 机械设备信息管理

项目部对入场设备进行登记,录入设备信息、资质信息、进场时间、操作人员信息等,必要时监理进行审核;系统根据设备库对无检验报告、资质过期等情况进行汇总和预警,将相关预警信息通知安全员进行关注和整改;平台根据设备信息库生成二维码,现场结合二维码应用,相关人员可通过扫描设备二维码查看设备信息及运行情况等。

5) 风险管理

项经部将危大工程清单管理的相关要求及内容纳入工程施工安全工作中,严格落实危大工程管理制度,确保风险管控措施落实到位;项经部利用信息化技术将风险清单上传至业主平台,直观展示项目目前的风险情况,确保项目运行可控。

6) 扬尘噪音监测管理

在现场安装扬尘噪音监测设备，采集 PM2.5、PM10、噪音指数、风速、风向以及温湿度等环境指标。并通过通信模块将现场监测数据传输到远程服务器上汇总、分析；当监测数值超标异常时，可通过平台系统消息、手机短信消息等方式对异常超情况进行预警通知，便于现场相关负责单位对异常情况进行处置，降低问题事件的持续时间。

7) 智慧化施工管理平台移动端

移动端的主要功能包括各子模块统计信息的查看、视频图片在线预览、信息下载，接受推送消息等。在劳务实名制、二维码设备巡检等场景中管理员和一线使用人员也可进行数据的录入等。智慧化施工管理平台技术架构如图 5。



Figure 5. Technical architecture of the intelligent construction management platform
图 5. 智慧化施工管理平台技术架构图

3. 实证效果与行业价值

3.1. 关键技术应用成效评估

基于多源数据融合的实时动态监测技术实现风险动态管控，显著提升风险响应速度；采用智慧平台集成化管理体系，构建分级分域智慧工地平台，集成视频监控、实名制系统、扬尘噪音监测等 9 个子系统，实现人员、设备、环境数据集中管控，快速识别施工风险；针对高风险工序工艺进行优化，降低事故

发生概率；智能化机械设备管理，减少违规操作，降低设备故障率。

高压水射流机器人的引入实现了防撞墙拆除的零扬尘作业，振动强度较传统工艺降低 80%；沥青面层及混凝土铺装层采用铣刨再生技术，使 3.8 万吨旧沥青实现 100%循环利用，1.2 万吨混凝土废料转化为生态护坡砖。

3.2. 推广应用价值

本项目形成的技术创新成果体系在标准化建设、核心技术研发、智慧管理转型、循环经济示范等方面具有显著的推广应用价值。通过编制《沉管隧道大修施工技术规范》及标准化操作手册，建立了涵盖设计、施工、验收全流程的技术标准体系，填补了行业空白。研发的“沉管接头三向位移自动化监测系统”等 12 项专利技术构建了完整的技术解决方案库，其中高压水射流机器人拆除工效提升 400%。开发的智慧工地平台集成 9 大子系统，创新性地采用“工地自治 - 建设单位协调 - 政府监管”三级管理模式，管理效率提升 35%，事故率下降 62%。构建的“铣刨再生 - 骨料转化 - 生态应用”资源循环体系使 4 万吨建筑废料综合利用率达 92%，降低碳排放 47%。该技术体系已在多个城市更新项目中成功应用，为行业提供了可复制的技术标准和管理范式，对推动基础设施建设领域的高质量发展具有重要价值。

4. 结论与展望

4.1. 理论创新与管理贡献

本研究通过系统性的工程实践与理论探索，构建了“技术集成 - 管理创新 - 数字赋能”三位一体的沉管隧道大修理论框架。在技术创新层面，提出了基于环境适应性的实时动态监测、预警方法体系，突破了传统人工监测技术的局限性；在管理创新方面，建立了以党建为引领的多元协同治理机制，形成了“政府主导 - 企业实施 - 社区参与”的新型管理模式；在数字化转型方面，开发了融合 BIM、物联网和人工智能的智慧管理平台，实现了工程全过程的数字化管控。这些创新不仅为城市更新背景下的基础设施维修提供了系统解决方案，更丰富了重大工程建设管理的理论内涵，对推动工程建设领域的高质量发展具有重要的理论价值和实践意义。

4.2. 未来研究方向与技术演进

面向基础设施可持续发展的新要求，后续研究将重点在以下方向深化探索：在数字技术应用方面，需进一步研究数字孪生技术与施工管理的深度融合，构建虚实交互的智能决策支持系统；在工程韧性提升方面，应重点开展极端气候条件下的结构性能演变规律研究，建立多灾害耦合作用下的风险评估与防控体系；在绿色智能建造方面，需要探索新型环保材料与智能施工装备的协同创新，推动工程建设向低碳化、智能化方向发展；在管理机制创新方面，应深入研究城市更新背景下重大工程的社会治理模式，构建更加开放、包容的工程治理体系。这些研究方向将共同推动基础设施建设领域的技术进步和管理升级，为城市可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王建国, 李伟. 沉管隧道结构健康监测技术研究进展[J]. 隧道建设, 2022, 42(3): 345-356.
- [2] 张明远, 陈志华. 高压水射流技术在混凝土拆除中的应用[J]. 施工技术, 2021, 50(15): 78-82.
- [3] 陈燕, 陈禹. 大型市政项目中智慧工地平台的应用[J]. 建筑施工, 2020, 42(8): 1547-1549.