

城市安全韧性背景下城市隧道智慧化改造方案

孙元, 顾吟, 万罗为

(杭州市市政设施管理中心, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对城市老旧隧道普遍存在的设备老化、感知缺失、系统孤岛等痛点,以杭州市西湖隧道改造工程为典型案例,提出了一套以“全时空感知、智能化集成、多要素联动、智慧化决策”为核心闭环的智慧化改造方案。该方案涵盖排水消防、防撞预警、结构健康监测、视频智能巡检、智慧照明和统一智感平台的具体工程路径,以及能够系统性提升隧道在监测预警、抵御吸收、快速恢复、学习优化等方面韧性能力的各项技术措施。对改造后系统运行数据进行的初步分析验证了方案的有效性,可以为同类城市隧道的更新改造提供一套以韧性为导向、技术可集成、实践可参考的范式,助力构建更安全、更具韧性的城市基础设施体系。

关键词: 城市隧道;智慧化改造;安全韧性;系统集成;运维范式转型

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0208-04

Intelligent Reconstruction Scheme for Urban Tunnels in Context of Urban Safety and Resilience

SUN Yuan, GU Yin, WAN Luowei

(Hangzhou Municipal Facilities Management Center, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the common pain points of aging equipment, insufficient perception and isolated systems in urban old tunnels, taking the Hangzhou West Lake Tunnel Reconstruction Project as a typical case, a set of intelligent reconstruction scheme centered on the closed-loop mechanism of full-space-time perception, intelligent integration, multi-factor linkage and intelligent decision-making is proposed. This scheme contains the specific engineering approaches of drainage and fire protection, anti-collision early warning, structural health monitoring, intelligent video inspection, smart lighting and unified intelligent perception platform, which can systematically upgrade a series of technical measures for the tunnel resilience in terms of monitoring and early warning, resistance and absorption, rapid recovery, learning and optimization. Preliminary analysis on the operational data of the reconstructed system has verified the effectiveness of the proposed scheme, which can provide a set of resilience-oriented, technology-integrable and practice-referable paradigm for the renewal and reconstruction of similar urban tunnels, and help build a safer and more resilient urban infrastructure system.

Keywords: urban tunnel; intelligent reconstruction; safety resilience; system integration; transition of operation and maintenance paradigm

0 引言

城市隧道是现代化城市交通网络的咽喉要道,其安全稳定运行直接关系到城市公共安全和经济社会活动的正常秩序。在“城市更新”与“韧性城市”建设的双重战略导向下,提升城市基础设施,尤其是隧道工程的安全韧性,已成为一项紧迫任务^[1]。安全韧性强调系统在面对内部故障、外部冲击或慢性压力时,能够及时预测、有效吸收、快速恢复并适应变

化的能力。具体到隧道工程领域,其内涵可具化为4项核心能力:对潜在风险的监测预警能力、对突发扰动的抵抗吸收能力、对功能损失的快速恢复能力、对运维体系的学习优化能力。智慧化技术通过全面感知、智能控制、协同调度和数据挖掘,正是实现这4项能力跃升的关键赋能路径。然而,我国众多建于早期的城市隧道(如杭州市西湖隧道),因受限于当时的技术标准和设计理念,普遍面临着机电设备老化、智能感知缺失、因各子系统数据割裂所形成的信息孤岛、运维依赖人工经验和被动响应等一系列问题,

当前,国内外同类隧道的智慧化改造多聚焦于单一系统(如交通监控)的功能升级,未能将智慧化

收稿日期: 2025-07-24

作者简介: 孙元(1988—),男,硕士,工程师,从事城市桥隧管理工作。

举措与韧性能力的系统性提升进行有机耦合,存在系统孤岛化、韧性赋能割裂、缺乏跨阶段协同等不足。因此,推动此类隧道的智慧化更新改造,绝非简单的设备换代或技术叠加,而是通过数字化、网络化、智能化技术,系统性重构其监测、预警、控制和决策体系,这是实现其从脆弱性向韧性转型的根本路径。

雷升祥等^[2]认为城市更新技术、韧性结构及材料、智能建造和智慧运维是韧性提升的重要方向。李威等^[3]认为应加强韧性城市信息化建设,推广使用机器人、物联网等高端装备技术,持续提升城市应急预警和监测水平。丁浩等^[4]认为隧道运营韧性,即为影响隧道正常运营通行的实际或潜在负面效应,进行防预、抵抗、适应、恢复的能力。方忠强等^[5]基于太湖超长水下隧道开展了隧道智慧设施总体设计研究,并运用数据挖掘处理算法构建高效云平台架构,以提高隧道运行效率和管理水平。徐永祥等^[6]以城市主干道隧道为例开展智慧化研究分析,通过智慧运营管理平台、数据交互、共享信息等一系列手段,在设备控制、事件预警、流程管理、应急处理等方面来提升隧道运营管理的业务能力。

本文选取杭州市西湖隧道这一具有典型性(湖底隧道、高交通流量、高安全敏感性)和紧迫性(已运行超20年)的案例,旨在超越常规的工程方案描述,聚焦于探讨如何通过一套集成化的智慧改造方案,将“全时空感知、智能化集成、多要素联动、智慧化决策”的技术思路,切实转化为提升隧道安全韧性的具体能力。本研究不仅详细规划了改造内容,更试图构建技术措施与韧性能力增强之间的清晰逻辑关联,并利用初期运行数据对改造效果进行初步评估,以期在城市隧道智慧化改造和韧性提升提供兼具理论参考和实践价值的解决方案。

1 项目概况与韧性短板分析

1.1 西湖隧道项目概况

西湖隧道建于2003年,位于西湖下方,西线全长约1 290 m,东线全长约1 265 m。隧道原配置了电气、给排水、通风、监控等基本机电系统。历经20余年运营,隧道在承担巨大交通流量的同时,其短板在新时代安全韧性要求下日益凸显。

1.2 基于韧性视角的现状问题分析

传统分析通常聚焦于设备老化、系统孤立等问题。本文围绕安全韧性的4个核心能力(预见/监测、

抵御/吸收、恢复/适应、学习/优化),对西湖隧道现状进行深度剖析,揭示其韧性短板:

(1)监测预警能力薄弱。隧道缺乏对结构健康(如沉降、裂缝)、环境参数(如洞内外光照度)、设备运行状态(如水泵效率、消防管网压力)的实时、全息感知,无法实现结构变形等风险的早期识别和预警,属于韧性链条的感知盲区。

(2)抵御吸收能力不足。在交通系统层面,隧道净空不足导致超高车辆碰撞事故频发(2023年达17次),是典型的设计容量与动态交通需求不匹配引发的物理冲击;在消防与排水系统层面,消防系统备用泵无法自动切换、排水泵故障频繁,表明关键子系统在局部故障或需求突增时冗余性和可靠性不足,吸收扰动、维持基本功能的能力较弱。

(3)快速恢复能力欠缺。各子系统(排水、消防、照明、监控)独立运行,缺乏协同联动机制。一旦发生事件(如火灾),无法自动触发通风排烟、应急照明、交通引导等一系列措施,应急处置高度依赖人工判断和操作,恢复周期长、效率低。

(4)自适应与优化能力缺失。运营数据分散于各信息孤岛,无法进行融合分析。照明系统不能随车流量和光线自动调节,能源管理粗放;设备维护主要依赖于定期巡检和事后维修,管理决策依赖经验,缺乏基于运行状态数据的预测性维护策略。中控系统长期处于低效、高耗的静态运行模式,无法通过学习优化实现效能提升。

这些问题在国内乃至国际上许多老旧隧道中普遍存在,表明推进以韧性为核心的智慧化改造具有广泛的现实必要性。

2 以韧性为核心的智慧化改造整体解决思路

2.1 全时空感知——筑牢韧性感知基底

通过在隧道全域布设传感器网络(如结构传感器、环境监测仪、智能摄像机、雷达、流量计等),实现对结构—设备—环境—交通流全要素状态的实时、连续、数字化采集。这相当于为隧道安装了全天候感官,是提升其监测预警能力、实现风险早发现的前提。

2.2 智能化集成——打通韧性数据血脉

构建统一的隧道设施设备智感平台,对内彻底打通排水、消防、照明、监控等子系统数据接口,对外能与城市级管理平台、公安交警、应急部门系统对接。通过数据汇聚、治理和融合,消除信息孤岛,形

成统一的数据资产。这是实现跨系统协同联动、快速恢复,以及支持智慧决策的基础。

2.3 多要素联动——构建韧性响应关节

基于智感平台,预设多种跨系统联动控制策略(如CO超标自动启停风机、火灾自动连锁消防和通风、超高车辆触发声光报警等),并且可以根据实际情况进行优化调整。实现从人找事到事找人、从单兵作战到集团军协同的转变,极大缩短应急响应时间,强化系统在扰动发生时的抵御吸收和快速恢复能力。

2.4 智慧化决策——赋能韧性优化大脑

利用大数据分析、人工智能模型(如深度学习视频分析、预测性维护算法),对汇聚的数据进行深度挖掘。实现设施状态的智能诊断、异常事件的自动识别、设备寿命的预测、能耗的精细化管理以及运维策略的优化建议。推动运维模式从定期巡检、事后维修向预测性维护、精细化管控升级,提升系统的学习优化能力。

3 总体方案——安全韧性导向的智慧化更新改造实践

围绕上述思路,西湖隧道改造工程重点实施了以下6个方面,每项均指向特定的韧性短板。

3.1 排水和消防系统韧性改造^[7]

目标:提升关键生命线系统在故障下的冗余可靠性和快速自恢复能力,强化抵抗吸收和监测预警能力。

措施:(1)将消防给水泵组改造为物联网泵组,增设稳压泵组,确保管网压力稳定,实现压力开关联锁启泵;(2)在泵房总管、消火栓支管等关键节点加装流量计和压力传感器,实时监测运行状态和漏水隐患;(3)增设消火栓智能末端测试装置,支持远程测试和监测。通过这些措施,确保了消防系统在紧急情况下的可靠启动和高效运行。

3.2 防撞预警系统建设

目标:主动预防因净空不足引发的碰撞事故,将被动承受冲击转为主动预警规避,直接提升抵抗吸收能力。

措施:在北入口部署基于三维激光雷达的防撞预警系统。该系统可实时扫描车辆轮廓,与隧道净空比对,对超高车辆提前触发声光报警和情报板提示,并联动视频取证。该系统自上线以来,显著降低了实际碰撞发生率,是提升隧道物理风险抵御能力

的直接体现。

3.3 结构健康监测系统建设^[8]

目标:实现对湖底隧道隐蔽性结构风险的长期、实时监测和预警,变定期人工巡检为连续自动监护,提升监测预警能力。

措施:在东、西线共18处典型断面布设表面裂缝计和测缝计,实时监测隧道衬砌的差异沉降和变形缝张开位移。每小时对采集的数据进行分析,超限即自动报警。该系统实现了对结构安全的常态化、数字化监护,变定期人工检测为连续自动监测,极大提升了对缓慢发展性结构风险的预见能力。

3.4 交通事件与设施完好视频智能检测系统建设^[9]

目标:提升对突发交通事件和设施表面病害的快速发现及自动识别能力,强化监测预警能力,并为快速恢复提供信息支撑。

措施:利用既有及新增的AI智能摄像机,通过后台视频分析算法,7×24 h自动检测车辆停滞、逆行、行人闯入、抛洒物等交通事件,以及路面破损、装饰板脱落等设施病害。系统上线后,已完成AI巡检数万次,自动识别并上报异常事件百余起,将人工巡检从大海捞针变为精准定位,大幅提升了事件发现的及时性和运维的主动性。

3.5 智慧照明控制系统建设

目标:实现按需照明,在保障行车安全舒适(抵抗吸收)的前提下,达成节能降耗的学习优化目标。

措施:安装智能调光控制器,根据洞口内外光照度仪实时数据,无级调节隧道内照明亮度,有效缓解黑白洞效应,提升行车安全舒适度。同时,通过能耗监测系统对照明等主要用电设备进行分项计量和分析,为节能优化提供数据支撑,体现了系统在保障安全前提下的自适应和资源优化能力。

3.6 设备设施智感平台建设^[10-15]

目标:作为“韧性大脑”,集成所有子系统,实现数据融合、智能联动、可视化管控和决策支持,是快速恢复和学习优化能力的承载中枢。

措施:采用“端-边-云”架构构建统一平台,具备4大核心功能:(1)全域感知与数据融合,打破信息孤岛;(2)智能决策与自动控制,预设多种联动规则,实现自动化运行和应急响应;(3)沉浸式可视化交互,通过二三维融合技术直观展示隧道全貌和实时状态,支持多端协同;(4)全生命周期数字化管理,建立设备电子档案,自动化生成运维报表。该平台是前述“感-联-智-决”思路的实体化,是隧道整体韧

性能力提升的承载中枢和指挥平台。

上述改造措施与韧性能力的对应关系总结见表 1。

表 1 改造措施与韧性能力的对应关系

韧性短板	智慧化改造措施	赋能的核心韧性能力
消防排水系统可靠性不足	消防物联网泵组改造;关键节点加装流量/压力传感器	抵抗吸收、监测预警
超高车辆碰撞风险高	激光雷达防撞预警系统	抵抗吸收(主动预防)
结构健康状态未知	布设结构健康监测传感器网络	监测预警
事件与病害发现不及时	视频 AI 智能巡检系统	监测预警、快速恢复(早期处置)
照明能耗高、舒适性差	智慧照明调光控制系统	学习优化(节能)、抵抗吸收(保障安全)
系统孤立、协同困难	统一设备设施智感平台	快速恢复(联动)、学习优化(决策)

4 实施效果评估与韧性提升分析

该改造工程已投入运行,通过对关键系统运行数据的收集和分析,可从以下维度来评估其对于提升隧道安全韧性的效果:

(1)监测预警能力量化提升。视频 AI 巡检系统累计自动识别并上报异常事件 150 余条,识别准确率稳定在 90% 以上,有效辅助了人工巡检工作,实现了风险的早发现。结构健康监测系统保持 100% 在线率,未发出重大报警,实现了状态可知。

(2)抵抗吸收和快速恢复能力增强。防撞预警系统累计识别 80 000 余次,超 3 m 的严重预警达 855 次,有效阻止了超高车驶入隧道。通过平台联动规则,提升了火灾等紧急情况下的设备启动和协同响应时间,并减少了人为误操作风险。

(3)学习优化能力初步显现。智慧照明系统根据环境光自动调节,年度节约电量约 7.3 万 kW·h。设备设施智感平台积累的运行数据,已开始用于分析水泵等关键设备的运行效能,为预测性维护提供数据基础。

(4)管理决策科学性提高。统一平台提供的全局数据看板,使管理人员能够实时掌握隧道整体运行态势,支持基于数据的科学决策。

5 结 语

(1)西湖隧道智慧化改造工程,是一次以“提升安全韧性”为核心目标、系统性应用现代信息技术对老旧基础设施进行赋能升级的实践探索。它不仅解

决了设备老化、感知缺失等具体问题,更深远的意义在于推动隧道运维范式实现了三大根本性转变:从依赖人工的被动响应转向基于感知的主动防控;从遵循经验的粗放管理转向依托数据的精准决策;从各自为政的单点管理转向平台支撑的协同治理。其中,“主动预防”强化了监测预警和抵抗吸收能力;“整体协同”保障了快速恢复能力;“数据驱动”支撑了学习优化能力。由此形成了从韧性理论提出→对应问题分析→智慧化方案设计(实现转变)→赋能韧性能力提升的完整逻辑链。这些转变正是基础设施韧性提升的内在要求。

(2)本研究的主要贡献在于:第一,将“安全韧性”这一宏观目标具体化为可操作、可集成的技术解决方案,并在西湖隧道这一复杂敏感场景中得到了实证;第二,提出的“感-联-智-决”闭环改造思路,为同类老旧隧道的智慧化升级提供了清晰的逻辑框架和技术路径;第三,初步的运行效果分析表明,智慧化改造在提升隧道风险预防、快速恢复和自适应优化能力方面具有显著潜力。

(3)展望未来,为进一步深化隧道智慧化和韧性水平,可积极探索如 DeepSeek 等通用大模型与垂直领域知识的结合,将其作为更高级别的智慧引擎接入隧道智感平台,在异常状态分析、复杂应急预案生成、跨系统协同优化等方面实现更深层次智能,远期则向特定场景的无人值守运维模式探索。同时总结提炼西湖隧道等先行项目的经验,推动制定城市隧道智慧化建设和改造的技术标准、数据规范,促进不同系统、不同隧道间的互联互通和数据共享,为构建城市级基础设施韧性管理平台做些基础性研究,并持续关注网络安全,将安全防护融入智慧化系统建设全过程,确保智慧系统本身的安全可靠,筑牢韧性提升的数字盾牌。为后续持续的技术迭代和管理创新,不断推动城市隧道成为更加安全、可靠、高效、绿色的韧性城市生命线,为城市高质量发展提供坚实支撑。

参考文献:

[1] 宋延辉.韧性城市背景下城市基础设施更新的机遇与挑战[J]. 散装水泥, 2025(6): 201-203.
[2] 雷升祥,赵伟,雷宇明.城市地下空间工程韧性提升研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10): 1627-1636.
[3] 李威,裴喜华.超大型城市韧性城市建设存在问题及对策建议——以深圳市为例[J]. 决策咨询, 2025(5): 35-38.
[4] 丁浩,邓实强,刘帅,等.公路隧道运营韧性研究进展[J]. 隧道建设(中英文), 2024(9): 1723-1735.
[5] 方忠强,张鹏,涂齐亮,等.太湖隧道智能运营设施设计方案研究

(下转第 231 页)