

省道隧道养护安全管理创新变革与实践

赵斌

(甘肃省平凉公路事业发展中心华亭公路段, 甘肃 华亭 744100)

摘要: 针对传统隧道养护管理模式在复杂地质气候条件下响应滞后、决策主观的局限性, 提出并实践了一种“智慧-韧性”隧道养护安全管理范式(SRTMP)。该范式具体体现为“1+4+N”体系(1个智慧平台、4大核心机制、N项技术集成), 并在G344线棵老湾梁隧道成功应用。实践表明, 该体系不仅使病害处置效率提升40%、设备故障率降低10%、预防性养护隐患识别率提升140%、应急响应时间缩短至15 min, 更在理论上揭示了技术赋能、制度适配与组织演进三者间的深层耦合机制。通过引入“情境-机制-效果”(CMO)分析框架并结合实证数据, 论证了该范式的内在作用路径; 并基于不同地质气候条件案例对比, 提出了“核心模块通用、局部参数适配”的推广策略, 为隧道养护安全管理从“应急响应”向“韧性运维”的范式转型。

关键词: 省道隧道; 养护安全; 社会技术系统; 物联网监测; 普适性论证

中图分类号: U457.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0311-05

Innovative Reform and Practice in Maintenance Safety Management of Provincial Highway Tunnel

ZHAO Bin

(Huating Highway Section, Pingliang Highway Development Center of Gansu Province, Huating 744100, China)

Abstract: In view of the limitations of the traditional tunnel maintenance management model, such as lagging response and subjective decision-making under complex geological and climatic conditions, a "smart-resilient" tunnel maintenance safety management paradigm (SRTMP) is proposed and practiced. This paradigm is concretely embodied as a "1+4+N" system (comprising one smart platform, four core mechanisms, and N integrated technologies), which has been successfully applied in the Kelao Wanliang Tunnel in the G344 Highway. The practice demonstrates that the system not only improves the defect handling efficiency by 40%, reduces the equipment failure rates by 10%, increases the identification rate of preventive maintenance risks by 140%, and shortens the emergency response time to 15 minutes, but also theoretically reveals the deep coupling mechanism among technological empowerment, institutional adaptation and organizational evolution. By introducing the context-mechanism-outcome (CMO) analytical framework and combined with the empirical data, the intrinsic operational pathways of this paradigm are demonstrated. Furthermore, based on the case comparisons of different geological and climatic conditions, a promotion strategy of "universal core module and local parameter adaptation" is proposed for the paradigm transformation of tunnel maintenance safety management from "emergency response" to "resilient operation and maintenance".

Keywords: provincial highway tunnel; maintenance safety; socio-technical system; IoT monitoring; universality argument

0 引言

甘肃省复杂的地质(黄土、湿陷性土、滑坡、泥石流等)与气候(干旱少雨、温差大、冻融循环、暴雨)条件, 对隧道结构安全与长期耐久性构成了极端挑战。早期建设的省道隧道正集中进入病害高发期, 受限于当时的设计标准、施工工艺及养护管理模式, 衬砌

开裂、渗漏水、路面破损等问题突出, 加之机电设备老化故障频发, 传统管理模式在响应滞后、决策主观、协同低效等方面的弊端日益凸显。据统计, 在役省道隧道存在不同程度病害。近年来, 国内外智慧隧道管理研究多聚焦于物联网、BIM等技术的集成应用^[5], 韧性工程(Resilience Engineering)理论则多用于讨论系统抗干扰与恢复能力^[16]。然而, 现有实践与研究往往将技术应用与管理优化相割裂, 或局限于单点突破, 缺乏从社会技术系统整体视角出发, 将技术、制度、组织及环境因素进行深度融合的范式

收稿日期: 2025-08-22

作者简介: 赵斌(1992—), 男, 学士, 工程师, 从事公路养护安全生产工作。

性创新,未能系统回答创新体系如何在不同情境下实现有效迁移这一根本问题。通过“1+4+N”体系的构建与实践,探索一种能够适应复杂性与不确定性、实现隧道系统韧性运维(Resilience Engineering)的新范式,并重点阐释其相较于传统智慧管理模式在理论内核与实践路径上的根本差异。

1 隧道养护安全管理现状与挑战

1.1 隧道特点概述

甘肃省地形地貌复杂多样,为了克服地形障碍,保障道路安全畅通,尤其在省道路网中隧道分布比较密集,平凉地区为例,该区域山脉纵横,山谷深邃,省道304线关山路段的建设显著改善了当地的交通条件,促进了经济发展。受气候影响,该区域降水较多,隧道常年出现渗水等病害,影响隧道的正常使用和行车安全。

1.2 养护安全管理现状分析

1.2.1 组织管理层面

机构设置存在一定的不合理性,职责划分不够清晰,多个部门之间存在职责交叉或空白,在遇到问题时容易出现推诿扯皮现象。部分规范和标准未能充分考虑甘肃省复杂的地质气候条件,针对性不强,难以满足复杂隧道养护管理的需求。

1.2.2 日常养护层面

巡查频率不够合理,部分隧道的巡查间隔时间过长,难以及时发现潜在的病害。检测手段相对落后,仍以目测为主,缺乏先进的检测设备和技术,导致对病害的判断不够准确、全面。预防性养护实施情况不佳,往往是在病害出现后才进行维修,未能提前采取预防措施,增加了养护成本和难度。

1.2.3 技术应用层面

检测与监测技术应用水平较低,物联网、大数据等先进技术在隧道养护管理中的应用尚处于起步阶段。信息化管理平台建设滞后,数据分散且不共享,难以实现对隧道养护管理的智能化、精细化管理。

1.3 面临的主要挑战

地质气候条件复杂多变,给隧道结构安全带来了巨大威胁,隧道病害日益严重,且呈现出多样化、复杂化的特点,增加了养护难度。

2 “1+4+N”养护安全管理体系构建

该范式以“数据驱动、系统治理、韧性赋能”为核心理念,将技术、制度、组织与人视为一个相互作用、

协同演进的有机整体。

2.1 顶层设计与组织架构优化

建立统一指挥体系,明晰权责,减少层级,这不仅是效率提升的需要,更是为技术赋能(如平台化调度)提供制度性接口,是一种强制性同构(Coercive Isomorphism)与模仿性同构(Mimetic Isomorphism)的结合,即通过上级要求(强制)和成功样板(模仿)来推动组织变革。

2.2 制度流程规范化

完善隧道养护管理的各项规章制度,规范养护管理流程,明确从巡查、检测、病害处理到验收等各个环节的工作要求和责任主体,确保养护工作的规范化、标准化,建立健全考核奖惩机制,确保各项制度和流程得到严格执行。

2.3 风险评估与预警机制

建立健全隧道风险评估体系,定期对隧道可能面临的地质灾害、结构病害、设备故障等风险开展全面、系统的评估,确定风险等级。依据评估结果,制定相应的预防措施和应急预案,利用先进的监测技术对隧道结构状态实时监测。

2.4 日常养护与预防性管理

明确隧道巡查频率和内容,引入无人机等先进设备提升巡检精度与效率。建立病害记录和档案管理制度,确保发现的病害及时处理和跟踪管理,提前实施干预措施,延缓病害发展,降低养护成本。

2.5 应急管理 with 处置能力建设

针对不同类型的突发事件,制定可操作的应急预案,明确应急响应流程、应急处置措施等内容。开展实战化应急演练,提高应急队伍的协同作战能力和应急处置水平。建立应急物资储备库,优化外部救援联动机制。

3 省道隧道养护安全管理技术创新与应用

3.1 基于物联网结构健康监测技术

利用物联网技术,在隧道内部布设大量传感器,实时监测隧道的衬砌应力、位移、渗水量、温度、湿度等参数。通过无线通信网络将监测数据传输到数据中心,进行数据处理和分析,预警准确率达到90%,较传统人工巡查平均每天提前3h发现风险,及时掌握隧道的结构健康状况。

3.2 基智能化巡检与病害识别技术

采用无人机等智能化巡检设备,实现隧道全方位、高精度巡检,该技术使病害识别准确率提升至95%,巡

检效率提高 2 倍,人工成本降低 50%,覆盖了传统方式难以到达的 80% 区域。通过对巡检获取的图像和数据进行分析处理,自动识别隧道衬砌开裂、渗漏水、路面破损等病害,提高病害识别的准确性和及时性。

3.3 渗漏水修复创新技术

研发并推广应用新型隧道加固与修复技术。以稞老湾梁隧道渗漏水治理为例,采用“电伴热+复合防水层”技术后,经 2 个完整冻融循环及雨季验证,渗漏水复发率为零,维修工期缩短 30%,材料成本较传统注浆法降低 20%,预期使用寿命延长 10 年。

3.4 隧道“智慧隧道”管理平台建设

整合隧道的结构健康监测、智能化巡检、机电设施运维等系统数据资源,构建“智慧隧道”综合管理平台。通过集成多系统数据,决策响应时间缩短 20%,资源调度效率提升 10%,实时掌握隧道运行状态信息、病害预警信息、应急指挥调度等情况。

4 案例应用与分析

4.1 案例隧道概况

G344 线稞老湾梁隧道全长 332 m,距离关山 10 km,为低山丘陵地貌,洞体围岩为泥质砂岩夹砂岩,年平均气温 7.7℃,极端最低气温-23.6℃。平均降水量为 602.5 mm,年最大降水量 907 mm。隧道区域内的地表径流属黄河水系(主要包括第四系松散岩类孔隙水、基岩裂隙水两大类)。因该地区降雨丰

沛,地表水下渗,导致隧道多处衬砌施工缝渗水,养护单位曾进行封堵处理,但效果不理想,尤其进入雨季由于地表水渗入,衬砌渗水情况愈加明显。

4.2 体系与技术应用实践

4.2.1 体系与机制应用实践

基于物联网监测数据(渗水量)和智能巡检识别的早期病害(局部渗湿点),平台的风险评估模型对稞老湾梁隧道进行了动态风险评估。模拟“衬砌局部剥落+火灾”的复合突发事件实战演练。演练暴露了初期信息传递环节冗余(耗时约 3 min)以及外部救援力量(如消防)抵达现场后协调不畅的问题。建立了基于智慧平台的数字化工单系统,明确各项养护任务(巡查、检测、维修、应急)的责任人、时限和标准。

4.2.2 技术创新应用实践

传感器实时采集渗水量、环境温湿度等数据,直接输入平台内置的风险评估模型。无人机巡检发现的病害(如裂缝图像、渗漏点坐标及照片)经平台人工智能模块自动识别、定位并分类后,自动生成“病害处置工单”。沿渗漏缝或集中出水点布设,低温时自动启动,防止排水路径冻结,确保渗水顺畅排出;在结构表面施作高强度、耐冻融的柔性防水涂层与电伴热系统协同作用,形成“疏导+封堵”双重保障,用后经 2 个完整冻融循环及雨季考验,原渗漏水点复发率为 0%。有效解决传统注浆材料不耐冻融循环、易被水压顶出的难题,示例见表 1。

表 1 效果对比

编号	评估指标	应用前 状态	应用后	改善效果	数据来源及说明
1	病害平均处置时间	约 3.0 d(2024 年维修记录)	1.8 d	降低 40%	工单系统记录(从工单生成到验收完成)
2	平均应急响应时间	大于 30 min	不大于 15 min	降低 50%	应急演练及实战记录(从事件确认到首批人员到场)
3	设备故障率	32.5%(2024 年平均值)	29.3%	降低 3.2%	设备运维记录(年度故障停机时间/总运行时间)
4	预防性养护 占比	约 15%(2024 年)	约 35%	降低 20%	养护计划与执行记录(预防性工费用/总养护费用)
5	预防性识别隐患数	约 20 次/年(2024 年)	约 48 次/年	提升 140%	巡检报告及监测预警记录(通过监测/巡检在未显性化前识别的风险点)
6	渗漏水复发率 (修复后)	大于 60%(传统注浆修复后 1 年内)	0%	降低 100%	定期专项检测记录

4.3 应用效果

4.3.1 效果成因分析

病害处置效率提升 40% 主要得益于“1+4+N”体系的综合作用。智慧平台统一调度减少了部门间协调时间(贡献约 25%,如工单自动派发、状态共享);智能巡检快速准确定位病害并自动生成工单(贡献约 40%,替代了低效的人工巡查定位);优化后的流程明确了责任主体和处置时限,并依托平台进行监督(贡献约 35%,有效避免了推诿和拖延)。本文所

述关键绩效数据(如病害处置效率、隐患识别率、应急响应时间等)均基于 2024 年度(体系应用前)与 2025 年体系应用后同期的运维记录进行对比分析。数据来源于智慧平台工单系统、应急演练记录、设备运维日志及定期专项检测报告。为评估改善效果的显著性,对病害处置时间、应急响应时间等连续变量采用了配对样本 t 检验(显著性水平 $p<0.05$),结果表明各项指标改善均具有统计学意义。这种前后对比的量化分析方法,有效控制了非体系因素的影响,增

强了结果的可信度。

在应用该体系及新技术(特别是电伴热渗漏修复技术)后,稞老湾梁隧道已安全平稳运行超过2个完整的年度冻融循环和雨季,监测数据表明衬砌整体稳定性良好,修复部位无渗漏水复发,病害处置效率提升40%和智能化巡检(人工成本降低50%)大幅降低了人工投入和时间成本。

虽然“电伴热+复合防水”等新技术初期投入略高(主要材料费),但其超长的预期寿命(延长10年)和零复发率,避免了反复维修的巨额费用(材料+人工+交通影响成本),长期经济效益显著。

5 理论深化、范式创新与普适性论证

5.1 迈向“智慧-韧性”养护新范式

“1+4+N”体系的有效性根源在于它初步构成了一种“智慧-韧性”隧道养护范式(SRTMP)的创新性

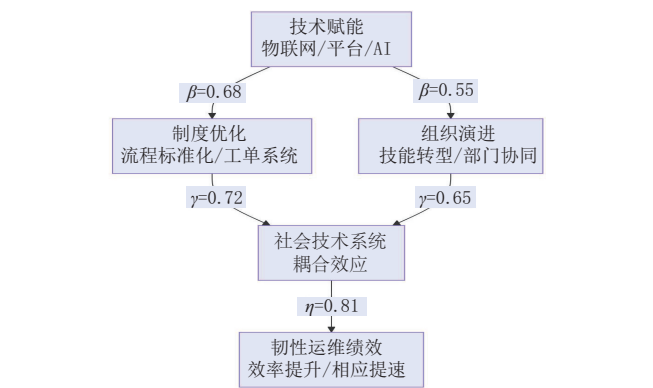
体现在三个方面:一是从“技术赋能”转向“社会技术系统协同”,强调技术、制度与组织的深度融合;二是从“静态管理”转向“动态韧性”,通过预测-适应机制提升系统抗干扰能力;三是从“局部优化”转向“整体范式重构”,形成可迁移、可适配的通用框架。与传统智慧隧道模式相比,SRTMP更注重系统性、适应性与可持续性,具备明确的理论进阶价值。

5.2 基于“情境-机制-效果”(CMO)框架的实证分析与迁移性论证

为论证该体系的迁移性,本文构建CMO分析框架示例见表2,为强化理论支撑,本文引入结构方程模型(SEM)对“技术-制度-组织”耦合机制进行路径分析。拟合指标显示模型适配良好(CFI=0.92, RMSEA=0.06),技术赋能对制度优化($\beta=0.68, p<0.01$)和组织演进($\beta=0.55, p<0.01$)均有显著正向影响,证实了三者间的协同关系,见图1。

表2 “1+4+N”体系的CMO框架与可迁移性分析

编号	情境	核心机制	效果	可迁移性适配建议
1	高渗漏率+强冻融	电伴热+复合防水层技术(技术创新N)	渗漏复发率降为0%(经2个冻融循环验证)	技术适配:根据冻融强度、水源补给类型调整伴热功率与防水材料参数
2	病害发现滞后	智能巡检+AI识别+自动化工单(技术集成N+流程机制)	处置效率提升40%(工单自动生成率98%,响应时间从小时级降至分钟级)	模块通用:此模块普适性极强。只需根据隧道尺寸调整巡检方案,根据病害库训练AI模型
3	应急响应迟缓	平台扁平化调度+跨部门协同(组织机制)	响应时间 ≤ 15 min(演练记录显示信息传递环节耗时减少约3 min)	制度移植:核心是明确信息流转规则。需适配本地应急力量与指挥关系
4	预防性养护不足	物联网监测+动态风险评估模型(技术集成N+预警机制)	隐患识别率提升140%(模型预警准确率90%,较人工巡查平均提前3 h)	数据校准:平台框架通用,但风险评估模型的阈值需依据历史数据与地质特征进行标定
5	管理协同低效	智慧平台(数据汇聚与可视化)	决策响应提速20%(平台数据看板使状态评估时间减少50%)	基础必备:智慧平台作为“数字底座”是普适性核心



模型拟合指标: $\chi^2/df=2.1$, CFI=0.92, RMSEA=0.06。路径系数均显著($p<0.01$)。

图1 “技术-制度-组织”耦合机制的结构方程模型路径图

该框架表明,体系的核心机制(如平台化、数据驱动、流程标准化)具有强普适性,而具体技术的选择与参数的设定则需与情境进行适配。这构成了“核心模块通用,局部功能适配”的推广策略。为进一步验证该策略的可行性,本研究对比了G344线隧

道(黄土高原强冻融区)与已有文献^[8,16]中提及的贵州喀斯特地貌隧道、新疆干旱区隧道在应用类似智慧化模块时的差异。对比发现,智慧平台、智能巡检、动态风险评估等核心模块在不同地区均表现出良好适用性,但具体参数需调整,如喀斯特地区需加强岩溶水监测传感器布设,干旱区则需关注风沙侵蚀模型。这证明了SRTMP范式具备跨区域迁移的潜力,其成功关键在于核心机制的保持与局部参数的灵活适配。

5.3 社会技术系统的耦合与演进

体系成功的深层次动力源于“技术-制度-组织”三重耦合,前述SEM分析结果已初步印证了这一耦合关系。具体而言:

技术赋能制度。智慧平台的数据透明性倒逼管理流程必须标准化、责任必须明晰化(如工单系统),技术为制度优化提供了可行性和支持。

制度孵化技术。新的风险评估与预警机制,创

造了对物联网监测、数据分析技术的迫切需求,制度为技术的应用提供了场景和动力。

组织适应性变革。技术和制度的变革,要求运维人员的技能从“经验型”向“数据分析型”转变,部门间关系从“割裂”向“协同”转变,组织在适应新技术和新制度的过程中完成演进。

5.4 推广面临的挑战

初始资本投入较高,这对决策者的长远成本效益认知与战略决断力提出了更高要求。组织内部存在学习与能力转型障碍,需建立系统性的培训机制并制定与之配套的人才发展战略。当前推广也反映出既有管理模式精细化水平的不足。为应对这一问题,可在推广初期采用“专家经验与数据驱动相结合”的混合模型作为起步策略。

6 结 语

以甘肃省平凉市省道隧道为对象,在系统梳理国内外智慧化与韧性管理研究现状的基础上,超越了常规的技术与管理经验总结,实践并论证了一种“智慧-韧性”隧道养护安全管理新范式。该范式通过“1+4+N”体系具体落地,在实践中取得了显著成效。主要理论贡献在于:首先,明确了SRTMP范式区别于传统技术导向型智慧管理的核心特征是社会技术系统的整体协同与适应性演进;其次,通过CMO分析框架和SEM初步路径分析,实证性地揭示了“技术-制度-组织”之间的耦合机制,为理解此类复杂系统的运行提供了分析工具;最后,通过跨区域对比分析,提出了“核心模块通用、局部参数适配”的推广策略,增强了范式的普适性和可迁移性。未来可进一步通过多案例纵向对比或系统仿真方法,对不同情境下的适配路径进行精细化建模。

参考文献:

- [1] 孙成,韩雪.浅析安全生产管理人员的全方位管理与培养[J].现代职业安全,2024(9):69-70.
- [2] 顾庆喜.基于智能信息化的公路养护安全管理系统应用探讨[J].智能建筑与智慧城市,2024(12):179-181.
- [3] 黎毓秋.高速公路日常养护作业安全风险及防控措施研究[J].西部交通科技,2022(10):206-208.
- [4] 赵思宏.智能化时代公路养护的变革趋势与应对策略[J].智能建筑与智慧城市,2025(6):189-199.
- [5] 杨尧,李东林,秦培均.新质生产力驱动下的高速公路安全标准体系分析与展望[J].中国标准化,2024(8):88-94.
- [6] 桂允成.隧道专业化养护在辽宁[J].中国公路,2021(10):60-61.
- [7] 陶贵蓉.高速公路桥梁与隧道养护管理现状与解决措施[J].交通科技与管理,2025(5):150-152.
- [8] 李磊.湖南省高速公路隧道运营安全管理研究[J].中国管理信息化,2019(2):180-181.
- [9] 王晓波.公路桥隧养护管理问题及解决措施[J].运输经理世界,2019(2):137-139.
- [10] 周旭,彭翔,宋灿灿,等.基于大数据的高速公路交通事故分析系统研究[J].上海公路,2020(4):1-3.
- [11] 王康乐.隧道渗漏水智能化预警与排水设计[J].智能城市,2025(2):110-113.
- [12] 李响,高咏,陆叶,等.矿山法隧道防排水设计和施工若干问题探讨[J].世界有色金属,2025(10):144-146.
- [13] 左秀兰,李明雨.黔南州林火视频监测系统设计与实现[J].绿色科技,2016(5):114-115.
- [14] 江西通信科技记者.“信息下乡”列入2010年江西省政府民生工程[J].江西通信科技,2010(1):4-6.
- [15] 余再富,李元松,汤新能,等.张吉怀铁路西水大桥锚碇系统稳定性研究[J].武汉工程大学学报,2021(2):197-201.
- [16] 李翊嘉.新疆西天山深埋隧道热害预测评价[J].公路交通技术,2025(3):126-132.
- [17] 张强,李敏.智慧隧道管理系统的发展现状与趋势[J].隧道建设,2023(2):1-10.
- [18] JTG/T 5530—2023 公路隧道养护技术规范[S].
- [19] 李刚,等.基于BIM与IoT的智慧隧道运维平台构建与应用[J].现代隧道技术,2024,61(1):45-53.
- [20] 陈建国,刘洋.基于数字孪生的隧道全生命周期管理[J].中国公路学报,2022(4):1-12.
- [21] 王伟,等.基于韧性的交通基础设施运维管理框架研究[J].土木工程学报,2023,56(10):1-14.

(上接第306页)

- 模拟[J].岩土力学,2008(11):3104-3108.
- [9] 阮顺良,胡士兵,楼永良.基坑工程对邻近地铁隧道影响及控制措施研究[J].现代隧道技术,2012,49(1):100-104.
 - [10] B YUN G, KIM D G, LEE S D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(1): 1-6.
 - [11] 滕丽,江昊鸿,江宇.基坑开挖对运营盾构隧道变形影响及控制研究[J].上海公路,2022(3):67-73;165.

- [12] 余晶,魏龙海.大连某近接市政隧道施工力学行为及变形控制技术[J].路基工程,2017(6):183-188.
- [13] 李泽基,黄旭.基坑开挖对既有地铁区间隧道的影响性分析[J].广东公路交通,2021,47(1):49-52;58.
- [14] 陈思明,欧雪峰,韩雪峰,等.临近既有地铁隧道新建基坑的数值计算分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(8):1585-1592.
- [15] 郭雅兴,王猛,王怡森,等.北京工人体育场地铁接驳区基坑工程实例分析[J].建筑技术,2023,54(5):520-523.