文章编号:2096-5052(2026)03-0135-14　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.13

济泺路穿黄北延隧道智能运维管理平台研发及应用

丁宁[1],王肖建[2*],毛升[3],孔维信[4],龚晨阳[5]
(1. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 成都旸谷信息技术有限公司, 四川 成都 610037;
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 4. 中国铁路济南局集团有限公司, 山东 济南 250001;
5. 中铁十四局集团电气化工程有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:针对济泺路穿黄北延隧道运维管理对象复杂、数据来源异构、环境高湿高压封闭、应急响应时效要求高等问题,研发并提出一套集感知、分析、预测、决策、联动与反馈于一体的智能运维管理平台。平台构建了由感知层、数据层、模型层和应用层组成的总体架构,建立统一运维对象标识与信息映射机制,实现结构、设备、环境、交通及运维业务数据的标准化治理与深度融合;结合多源感知、机器学习、规则引擎和 BIM(building information modeling)轻量化技术,形成交通态势预测、设备故障诊断、环境风险预警、三维可视化展示及应急联动处置等核心功能。研究表明,该平台可有效提升水下隧道运维效率、预测预警能力与应急处置水平,可为城市水下隧道智能运维提供工程参考。

关键词:水下隧道;智能运维;多源数据融合;应急联动
中图分类号:TP319;U459.5　　**文献标志码**:A

引用格式:丁宁,王肖建,毛升,等. 济泺路穿黄北延隧道智能运维管理平台研发及应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):135-148. Ding Ning, Wang Xiaojian, Mao Sheng, et al. Development and application of an intelligent operation and maintenance management platform for the Jiluo Road North Extension Yellow River Tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):135-148.

Development and application of an intelligent operation and maintenance management platform for the Jiluo Road North Extension Yellow River Tunnel

Ding Ning[1], Wang Xiaojian[2*], Mao Sheng[3], Kong Weixin[4], Gong Chenyang[5]
(1. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
2. Chengdu Sunrise Information Technology Co., Ltd., Chengdu 610037, Sichuan, China;
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
4. China Railway Jinan Group Co., Ltd., Jinan 250001, Shandong, China;
5. China Railway 14th Bureau Group Electrical Service Engineering Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: To address the challenges associated with the operation and maintenance of the operation and maintenance of the Jiluo Road North Extension Yellow River Tunnel, including complex maintenance objects, heterogeneous data sources, enclosed high-humidity and high-pressure conditions, and stringent requirements for rapid emergency response, an intelligent operation and maintenance management platform integrating sensing, analysis, prediction, decision-making, coordination, and feedback was developed. An overall architecture comprising a perception layer, a data layer, a model layer, and an application layer was adopted, and a unified identification and information mapping mechanism for operation and maintenance objects was established, thereby enabling standardized governance and deep integration of structural, equipment, environmental, traffic, and maintenance management data. Multi-source sensing, machine learn-

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-06-16;**接受日期**:2026-07-13;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003);中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研究资助项目(TSYSDY-JLLCHSD[2020]-13)
第一作者简介:丁宁(1988—),男,山东滕州人,工程师,主要研究方向为桥隧工程管理。E-mail:ctgs2021@ sina.com
*通信作者简介:王肖建(1988—),男,河南安阳人,工程师,硕士,主要研究方向为大数据、人工智能。E-mail:184531359@ qq.com

ing, rule engines, and lightweight BIM technologies were integrated, and key functions such as traffic state prediction, equipment fault diagnosis, environmental risk early warning, three-dimensional visualization, and coordinated emergency response were supported. The results indicated that operation and maintenance efficiency, predictive warning capability, and emergency response performance in underwater tunnels were effectively improved, and an engineering reference for the intelligent operation and maintenance of urban underwater tunnels was provided.

Keywords: underwater tunnel; intelligent operation and maintenance; multi-source data fusion; emergency coordination
Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-06-16; **Accepted**: 2026-07-13; **Published**: 2026-09-20

0 引言

随着城市化进程加快和跨江、跨河通道建设需求的持续增长,大直径水下隧道在城市交通体系中的应用日益广泛。相比普通公路或地铁隧道,水下隧道通常具有埋深大、服役环境封闭、水压高、结构与系统复杂度高等特点,其运行安全和运维管理面临更为严峻的挑战[1-2]。一旦发生结构病害、设备故障或突发事件,往往具有处置难度大、影响范围广、次生风险突出的特征,对隧道运维管理的精细化、智能化水平提出了更高要求。

传统隧道运维管理主要依赖人工巡检和分散的监控系统,系统标准不统一、数据共享困难,难以支撑跨系统协同与全生命周期管理[3]。针对上述问题,近年来国内外学界和工程实践逐步引入大数据、人工智能和数字孪生等技术,通过多源数据融合与智能分析等方法,推动隧道运维管理向数据驱动和智能化方向发展[4]。在隧道运维管理数字化研究方面,基于 BIM(building information modeling)的信息集成与可视化管理是较早开展的重要方向。黄廷等[5]构建了基于 BIM 的公路隧道运维管理系统,实现了结构、机电设备与运维信息的三维集成与可视化管理。胡珉等[6]从全生命周期视角提出基于 BIM 的隧道运维决策支持系统,通过统一编码和信息映射实现多源信息集成,并在病害追溯、设备状态诊断和养护策略优化方面取得了良好效果。张春雷等[7]则面向地铁场景,提出最小维护单元粒度的精细化 BIM 模型,实现病害三维呈现与动态履历回溯。围绕隧道智能监测与多源数据利用,张美莲等[8]系统研究了监测数据的采集、特征提取与分发机制,为多源异构数据的统一管理提供了技术路径。Liu 等[9]提出融合多模态 YOLO 与激光扫描的盾构隧道纵向接缝张开量自动识别与量化方法,实现了隧道结构病害的智能检测与定量分析。Han 等[10]进一步引入多光谱信息与深度学习融合模型,提高了复杂光照条件下病害识别的鲁棒性。针对隧道复杂运行环境,金盛等[11]提出多源数据驱动的驾驶员识别方法,有效提升了低分辨率监控条件下的识别精度。在运行状态预测与结构健康评估方面,王九胜等[12]提出基于时空关系的多细粒度隧道交通流预测模型,在复杂交通条件下取得了较高预测精度。Yu 等[13]采用机器学习方法对隧道沉降和衬砌变形进行预测,提高了模型在小样本条件下的稳定性和可靠性。随着数字孪生技术的发展,其在隧道运维领域的应用逐步深化。张小宁等[14]将数字孪生与物联网传感及人工智能模型相结合,提出隧道火灾实时量化、预测与风险评估方法,实现了灾害演化过程的动态研判。赵鹏等[15]提出基于数字孪生的铁路隧道智能运维框架,系统阐述了数据映射机制、关键技术及实现路径,并验证其在提升运维效率与智能化水平方面的可行性。

总体来看,现有研究为隧道运维数字化、智能化提供了重要基础,但仍存在三方面不足:一是部分平台仍偏重运行状态展示和单点报警,跨系统、跨专业、面向对象的数据关联不足,难以形成统一的对象级状态表征;二是智能预测模型与运维业务流程衔接不够,模型输出难以直接转化为巡检、工单、交通管控和应急联动策略;三是针对水下隧道高湿、高水压、封闭空间和排水通风耦合风险的权重修正、阈值设置和联动机制研究仍相对不足。鉴于此,本研究以济南济泺路穿黄北延隧道为工程背景,面向水下隧道运维管理对象复杂、环境风险高和应急时效要求严苛等特点,构建集多源感知、智能分析、预测预警、辅助决策与联动处置于一体的智能运维管理平台。主要创新体现在:一是建立结构、设备、环境、交通和业务对象的统一标识及信息映射机制,实现跨系统数据的对象级关联;二是提出考虑场景偏离、空间耦合和历史异常记忆的对象状态指数,用于表征水下隧道高水压、高湿和封闭环境下的运行风险;三是将设备故障识别、交通运行预测和环境风险预警结果统一纳入综合风险评分,支撑预警分级、处置优先级排序和联动预案匹配;四是结合异源告警佐证、场景化权重修正和结果反馈机制,形成适用于水下

隧道的闭环应急联动流程。

1　项目概况与运维管理挑战

济泺路穿黄北延隧道工程起自济泺路隧道敞开段,向北延伸至国道 G308,全长 4 328 m,其中盾构段长 2 045 m,管片外径 15.2 m。工程采用公轨合建双洞双层方案:上层为双向六车道城市主干路,设计速度 60 km/h;下层预留城市轨道交通空间(设计速度 100 km/h)及市政管线和逃生通道。隧道以盾构方式下穿邯济铁路、鹊山水库等关键控制区,施工条件复杂、技术实施要求较高。项目建设周期约 4 年,已于 2025 年 8 月 10 日建成通车,在济南市北部城市交通体系中发挥重要通行功能。

该隧道水域段穿越地层主要由粉土、粉质黏土、粉砂、细砂及中粗砂等组成,局部夹薄层粉土,部分砂层含水较丰富、渗透性较强。水域段上覆鹊山水库库水及坝体填土,下伏地层呈多层分布特征,隧道埋深约为 16~19 m,其工程地质与水文条件如图 1 所示。受地层含水性、库水补给、结构埋深及封闭运行环境等因素影响,该隧道具有典型水下隧道工程特征,衬砌接缝、管片螺栓及排水、通风、消防、供配电等系统在长期运行中可能受到渗漏、凝露、腐蚀和高负荷运行的共同作用,因而对隧道运维管理提出更高要求。

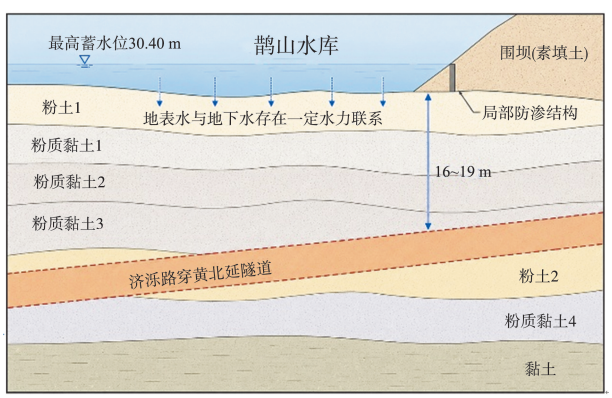


图 1　隧道水域段地质与水文条件示意图

Fig.1　Schematic diagram of geological and hydrogeological conditions in the underwater section of the tunnel

基于上述工程条件,济泺路穿黄北延隧道运维管理主要面临以下挑战。

(1)结构病害风险高,监测与诊断难度大。隧道长期受高水压作用,易出现衬砌渗漏、钢筋锈蚀等问题,进而导致衬砌剥落、管片裂缝及结构失稳等病害。这类病害具有隐蔽性和累积性特点,早期难以通过人工巡检发现,而一旦快速发展,后期修复成本极高。

(2)突发事件破坏力大,应急响应要求高。隧道一旦发生火灾、淹没或重大交通事故,破坏力和次生灾害往往远超常规隧道。而传统模式下的事件响应主要依赖人工值守与视频监控,信息获取和传递速度慢,难以满足秒级响应的需求。

(3)交通流复杂,运行压力大。隧道处于城市核心交通枢纽位置,承载着高密度车流。高峰期交通流波动强烈,一旦事故或故障发生,易引发拥堵并外溢至地面。

此外,现有隧道运维系统多为分散建设,设备监控、环境监测、交通管理与养护管理等子系统之间标准不统一、接口不兼容,数据难以共享,难以有效支撑隧道设施的全生命周期管理。运维资源配置仍主要依赖人工经验,缺乏基于实时运行数据的动态优化机制,运维效率与资源利用水平有待进一步提升。在突发事件处置方面,现有系统以被动监控和报警为主,智能联动与预测能力有限,在复杂运行场景下对快速响应需求的支撑能力仍显不足。同时,现有运维系统功能相对静态,缺乏基于运行数据的持续学习与模型迭代机制,在应对新型风险和极端工况时仍存在一定局限性。

2　智能运维关键技术

2.1　运维对象统一建模与标识

结合济泺路穿黄北延隧道运维场景,平台将运维对象划分为结构对象、设备对象、环境对象、交通对象和业务对象。其中,结构对象包括管片、衬砌及附属构件;设备对象包括通风、排水、消防、照明、监控与通信等机电设施;环境对象包括液位、风速、温湿度、照度及有害气体监测单元;交通对象包括车道、检测断面和交通事件;业务对象包括巡检任务、维修工单、报警记录和养护履历。在对象建模过程中,平台以 BIM 模型为几何与空间语义基础,提取构件编码、安装位置、专业类别和层级关系等信息,建立运维对象与 BIM 构件之间的映射关系。对于结构和设备类对象,直接继承 BIM 模型中的位置和属性信息;对于环境、交通和业务类对象,则依据传感器点位、检测断面、事件位置和业务台账建立扩展对象,并与相关构件或区段进行关联,从而实现设计信息、运行信息与管理信息的统一表达。

为支撑跨系统数据关联,每一运维对象均分配全局唯一标识 Object ID,并以其作为平台对象级管理的核心索引。统一标识采用分层编码方式,表达

式为

$$I_D = P-T-S-N-L-V, \quad (1)$$

式中：P 为项目前缀，取 2~4 位大写字母，用于表示项目或平台名称；T 为对象类型代码，取 1 位大写字母，分别表示结构、设备、环境、交通和业务等对象类型；S 为对象子类型代码，取 2~4 位字母或字母数字组合，用于表示对象子类型，如排风风机、排水泵、摄像机、液位计等；N 为同类对象顺序编号，取 2~8 位字母数字组合，由设备台账或对象主数据自动生成；L 为空间位置代码，由区段号、桩号、方向、层级或安装位置组合形成，用于表达对象空间位置；V 为时间戳或版本号，采用 8 位日期或版本序号，用于记录对象接入、替换或更新信息。以某排风风机统一标识“BY-D-PF-LD1-WK6+600-20250716”为例，其中“BY”表示项目平台前缀，“D”表示设备对象，“PF”表示排风风机，“LD1”表示设备编号，“WK6+600”表示安装桩号，“20250716”表示接入时间。

统一标识生成时，平台首先依据对象所属专业和功能属性确定类型代码与子类型代码，再结合 BIM 构件编号、设备台账编号和安装里程生成位置代码，最后叠加时间信息形成全局唯一 Object ID。为避免重复建档，平台在对象入库前设置多重校核规则：首先校核 BIM 构件编号或设备台账编号，判断是否已存在同一实体对象；其次校核对象类型、空间位置和安装桩号，识别同一位置下的重复录入对象；再次校核设备出厂编号、资产编号或传感器点位编号，避免因名称变更、系统迁移或台账导入造成重复编码。若校核结果显示为同一物理对象，则保留原 Object ID，仅补充或更新其属性信息；若为同一位置的不同对象，则按照子类型和顺序编号生成新的 Object ID，并建立空间关联关系。

对于设备更换、位置调整和状态变更等情况，平台采用原标识归档与新标识继承相结合的方式处理。设备仅发生维修、部件更换或参数校准时，Object ID 保持不变，并在维修工单和设备履历中记录变更内容；当设备整体更换、传感器重新布设或对象功能发生实质变化时，原 Object ID 转入停用或归档状态，新设备根据当前类型、位置和接入时间生成新的 Object ID，同时在对象关系表中记录替换与继承关系。

2.2 多源感知与数据融合

平台接入的数据既包括结构、设备、环境、交通等实时感知数据，也包括视频识别、巡检养护、维修工单和应急处置等业务数据。按照数据来源和业务属性，可将多源数据划分为结构状态数据、机电设备数据、环境监测数据、交通运行数据、视频识别数据、运维业务数据和外部辅助数据等类型，具体如表 1 所示。

表 1 数据类型及主要内容

Table 1 Data types and main contents

数据类型	主要内容
结构状态数据	管片、衬砌、接缝、渗漏、裂缝、剥落等
机电设备数据	电流、电压、启停状态、振动、温升、故障码、在线状态等
环境监测数据	液位、风速、温度、湿度、照度、CO 浓度、有害气体浓度等
交通运行数据	车流量、平均速度、占有率、排队长度、拥堵指数等
视频识别数据	停车、逆行、行人闯入、抛洒物、烟雾、火焰、事故等
运维业务数据	巡检任务、维修记录、处置时长、报警等级、复核结果等
外部辅助数据	降雨、温度、节假日、周边道路管控状态等

在数据组织上，平台先按照更新特征将上述数据进一步划分为连续监测数据、周期采样数据和事件触发数据。在时间维度上，连续型数据采用均值聚合或末值保持方式对齐，周期型数据采用前向填充或线性插值方式补齐，事件型数据按发生时刻映射至最近时间片，并保留事件原始时间戳、持续时间、事件等级和人工复核结果。为协调不同业务环节的时间尺度差异，平台采用分层时间尺度处理机制：在感知层，视频识别、设备报码和交通检测数据均保留原始时间戳，其中视频异常识别可达到毫秒级响应，主要用于事件首报、告警触发和人工复核提示；在融合层，系统以 1 min 为统一时间步长，将连续监测数据、周期采样数据和事件触发数据转换为对象级状态序列；在模型层，融合后的对象级状态序列根据不同业务任务形成差异化分析时域：交通运行预测面向未来 5 min 交通状态，设备故障预测面向未来 30 min 故障风险，环境风险预警则根据液位、有害气体、烟雾、温湿度、风速和通风状态等指标变化速度设置 3~10 min 分析窗口。由此，毫秒级识别主要服务于快速告警，1 min 时间步长主要服务于跨源数据融合，不同模型分析时域则服务于交通预测、设备故障预测和环境风险预警等业务任务。在空间维度上，平台依托统一运维对象标识、隧道里程体系和 BIM 构件信息，构建由区段号、桩号和专业位置共同组成的对象索引，将传感器、设备、视频监控点和交通检测断面映射至对应运维对象，进而形成面向对象的时序状态集合。

考虑到水下隧道在高峰交通、夜间运行、火灾预

警、淹没预警和设备异常等不同工况下的正常基准并不一致,监测量异常程度采用分场景偏离度表征,而不采用固定阈值直接判断。设运维对象 o 的第 i 个监测量在时刻 t 的观测值为 $x_{oi}(t)$,对应场景 k 和时段 h 下的参考基准为 $b_{oi}^{(k,h)}$,波动尺度为 $\sigma_{oi}^{(k,h)}$,设备、交通或环境负荷修正项为 $l_o(t)$,则其偏离度表示为

$$A_{oi}(t)=\frac{|x_{oi}(t)-b_{oi}^{(k,h)}|}{\sigma_{oi}^{(k,h)}+\theta l_o(t)+\varepsilon}, \tag{2}$$

式中,$A_{oi}(t)$ 为监测量的场景偏离度,θ 为负荷修正系数,ε 为微小常数。$b_{oi}^{(k,h)}$ 由同类对象在相同场景 k、相同时段 h 下经人工复核为正常运行的历史样本均值确定;当样本分布存在明显偏态或极端值时,采用中位数作为稳健估计值。$\sigma_{oi}^{(k,h)}$ 优先采用相同样本集合的标准差确定;当样本存在异常波动或极端值干扰时,采用四分位距换算值进行稳健修正,并剔除通信中断、设备检修、人工测试和已确认异常事件时段。$l_o(t)$ 按对象类型分别计算:设备对象以当前负载率为主,结合启停频次和电流负荷归一化修正;交通对象以占有率为主,结合流量和拥堵指数归一化修正;环境对象以液位变化率为主,结合湿度水平和通风负荷归一化修正。θ 采用历史样本中负荷指标与监测量波动幅度的回归系数确定;当样本量不足以支撑回归分析时,按低、中、高负荷分组统计各组波动幅度差异进行修正;ε 取小于正常波动尺度的常数,仅用于数值稳定。

在对象级融合阶段,状态合成不局限于对象内部单点数据,而是同时考虑相邻区段的传播影响和近期异常事件的累积作用。设对象 o 的对象内权重为 $\omega_{oi}^{(k)}$,设邻接对象集合为 $N(o)$,对象 o 与对象 j 的空间耦合系数为 ρ_{oj},则对象级融合状态指数可表示为

$$R_o(t)=\sum_{i=1}^{n_o}\omega_{oi}^{(k)}A_{oi}(t)+\lambda\sum_{j\in N(o)}\rho_{oj}\bar{A}_j(t)+\mu H_o(t), \tag{3}$$

式中,$R_o(t)$ 为对象 o 在时刻 t 的综合状态指数,$\bar{A}_j(t)$ 为邻接对象 j 的平均偏离度,λ 为空间传播系数,μ 为事件记忆系数,$H_o(t)$ 为对象历史异常记忆项。对象内权重 $\omega_{oi}^{(k)}$ 由历史可靠性、场景敏感性和实时可用性共同确定。历史可靠性根据传感器在线率、数据完整率和异常跳变率计算;场景敏感性根据历史同类事件中该指标对异常识别的贡献度确定,优先采用事件回放中的特征重要性结果赋值;当历史样本不足时,结合专家校核结果进行修正;实时可用性根据当前数据更新时间差、缺失状态和设备在线状态确定。3 类指标归一化后加权合成,并再次归一化,使同一对象内各监测量权重之和为 1。空间耦合系数 ρ_{oj} 主要依据对象间里程距离、上下游关系、通风联系、排水联系和系统耦合关系确定。对于同一区段或相邻区段内具有直接传播关系的对象,ρ_{oj} 取较高值;对于空间距离较远、系统关联较弱的对象,ρ_{oj} 按距离衰减。空间传播系数 λ 通过历史事件回放确定,即比较引入相邻区段状态前后对事件识别准确率和误报警率的影响;事件记忆系数 μ 根据历史异常事件对后续状态影响的持续程度确定。对于水下隧道低点区段、排水系统、通风系统、围坝邻近区段和历史渗漏敏感区段,可适当提高空间传播和事件记忆项权重,以反映水下隧道风险扩散和滞后影响特征。

为体现异常事件对后续运行状态的滞后影响,历史异常记忆项采用时间衰减形式表示:

$$H_o(t)=\sum_{m=1}^{M}\xi_m g_m\exp[-\tau(t-t_m)], \tag{4}$$

式中,t_m 为历史异常事件或处置事件发生时刻,g_m 为事件等级系数,ξ_m 为事件类型修正系数,τ 为时间衰减参数。其计算口径为:g_m 根据事件分级确定,关注、预警、报警等级分别赋予由低到高的等级系数;ξ_m 根据事件类型确定,渗漏、排水异常、通风异常、设备故障、交通事故等事件按照其对对象后续状态的持续影响程度赋值,其中对低点区段排水异常、围坝邻近区段渗漏和通风异常等水下隧道敏感事件赋予较高修正系数;τ 由同类事件处置后状态恢复过程拟合得到,可根据对象状态指数回落至正常波动区间所需时间进行估计。对于已确认误报警事件,可降低其 g_m 或 ξ_m,以减少对后续状态判断的干扰。当对象近期发生过故障、误报警、短时失稳或人工处置事件时,其记忆效应不会立即消失,而是随时间逐步衰减,从而反映设备退化、环境扰动和交通事件余波对后续状态的持续影响。

经过分场景偏离度计算、对象级空间耦合融合和历史异常记忆修正后,多源异构数据被转换为统一的对象状态指数 $R_o(t)$。该指数既反映对象当前监测值相对同场景基准的偏离程度,又包含相邻区段传播影响和近期异常记忆,可直接作为后续设备故障识别、交通运行研判、环境风险预警和应急联动决策的输入变量。

2.3　智能分析与预测建模

平台围绕设备故障识别、交通运行预测和环境风险预警 3 类任务开展智能分析与预测建模,3 类任务的模型输出经归一化处理后进行综合风险研判。建模过程以对象状态指数 $R_o(t)$ 为核心状态表

征,并结合对象级原始监测量、空间邻接信息和历史运维记录构造状态演化特征,以增强模型对短时异常、持续退化和区段传播效应的识别能力。

为刻画运维对象在时间维度上的演化特征,采用固定长度滑动窗口提取状态均值、变化速率、波动强度和空间梯度等特征。滑动窗口长度 W 根据不同对象运行周期、数据采样频率和风险演化速度确定。设备类对象的滑动窗口长度典型取值为 10 min,用于覆盖主要启停或负载波动过程;交通类对象的滑动窗口长度取值为 5~10 min,用于覆盖短时交通状态演化周期;环境类对象的滑动窗口长度取值为 3~10 min,其中液位、有害气体和烟雾等快速变化指标取 3~5 min,温湿度、风速和通风状态等相对缓变指标取 5~10 min,以兼顾突发性环境风险识别和持续性环境状态研判。设对象 o 在时刻 t 的状态指数为 $R_o(t)$,则其状态演化强度 $E_o(t)$ 定义为

$$E_o(t)=\alpha\bar{R}_o(t)+\beta\Delta R_o(t)+\gamma\sigma_o(t)+\delta G_o(t), \quad (5)$$

式中,$\bar{R}_o(t)$ 为窗口内状态均值,$\Delta R_o(t)$ 为状态增量,$\sigma_o(t)$ 为窗口内波动强度,$G_o(t)$ 为对象与相邻区段之间的空间梯度项,α、β、γ、δ 为调节系数。上述系数根据训练集中不同特征对故障识别、交通状态预测和环境异常识别结果的贡献度确定,并结合对象类别进行校准。对于排水、通风、供配电及低点区段等水下隧道关键对象,状态增量、波动强度和空间梯度项在系数校准中赋予更高关注度,以反映高外水压力、封闭空间和区段传播效应对运维风险的放大作用。

在设备故障预测任务中,按设备类别分别建立随机森林分类模型,不同类型设备不采用统一特征模板。风机类设备重点提取电流、振动、温升、启停频次和通风负荷特征;排水类设备重点提取液位变化、启停时长、电流波动和联动响应特征;供电保障类设备重点提取电压、电流、切换状态和负载波动特征;监控通信类设备重点提取在线率、信号稳定性和异常中断时长等特征。除对象原始监测量外,状态指数 $R_o(t)$、状态演化强度 $E_o(t)$、近期维修次数、故障复发间隔和相邻对象异常状态也一并纳入输入特征,用于提升模型对隐性退化和复发性故障的识别能力。其中,排水、通风和供配电设备作为水下隧道安全运行的关键保障对象,在特征构建中进一步强化液位响应、通风负荷、备用设备切换和相邻区段异常状态等变量,以适应水下隧道高湿、高外水压力和封闭环境下设备风险演化较快的特点。设备故障标签采用基于时间窗口观测和未来时域判定的方式构造。以当前窗口结束时刻为基准,在后续预测时域 H 内若发生故障报码、人工确认故障或停机处置事件,则记为故障样本,否则记为正常样本。设备故障预测时域取为 30 min,主要用于支撑故障预警、人工复核和维修工单提前派发。为避免随机划分造成未来信息泄漏,模型训练集和测试集按时间顺序划分,即以前 80% 连续时间段样本作为训练集,后 20%连续时间段样本作为测试集,模型参数调优仅在训练集内部完成,测试集不参与参数选择。考虑到故障样本占比通常较低,训练阶段对故障样本设置较高类别权重,以减弱类别不平衡对识别效果的影响。各设备类别分别训练随机森林分类模型,数据集选取隧道设备运行监测历史数据共约 2.1×10^5 条,决策树数量设置为 200,最大深度设置为 8,最小叶节点样本数设置为 5。设备故障识别评价除准确率外,还引入精确率、召回率、F_1 值和 AUC 等指标,以重点反映误报、漏报及类别不平衡条件下的识别效果。

在交通运行预测任务中,以检测断面为建模对象,采用随机森林回归模型构建短时交通状态预测模型。输入特征由本断面状态、相邻断面状态和事件扰动状态组成。本断面状态包括历史流量、平均速度、占有率和车道开放状态;相邻断面状态包括上下游断面流量差、速度差和状态梯度;事件扰动状态包括事故、占道施工、限流控制和恶劣环境影响等标记变量。对象状态指数 $R_o(t)$ 和状态演化强度 $E_o(t)$ 同时引入回归模型,用于反映当前交通运行偏离程度及其变化趋势。交通运行预测以连续 5~10 个 1 min 状态片作为输入,输出未来 5 min 交通状态。交通运行预测模型采用与设备故障预测模型一致的时间顺序划分口径,即训练集和测试集按前 80%连续时间段样本与后 20%连续时间段样本划分,以避免时间序列样本随机划分导致预测结果偏乐观。模型评价采用平均绝对误差、均方根误差、平均绝对百分比误差和 R^2 等指标。与仅依赖历史流量序列的预测方式相比,该建模方法能够同时表征交通波动、事件干扰和区段传播效应,适用于隧道短时交通预测场景。

环境风险预警主要面向液位异常、有害气体积聚、通风失效和火灾烟雾扩散等场景,采用规则引擎与对象状态指数联合判别方法,不单独依赖单一阈值。判别输入包括液位变化率、泵组启停状态、排水响应时间、风速、湿度、有害气体浓度、烟雾识别结果、通风设备状态及相邻区段环境状态指数。环境类对象的分析窗口根据指标变化速度设置,其中液位、有害气体和烟雾等快速变化指标采用 3~5 min 窗口,用于识别突发性环境风险;温湿度、风速和通风状态等相对缓变指标采用 5~10 min 窗口,用于

判断持续性异常趋势。在判别过程中,平台首先计算环境对象的状态指数和状态演化强度,并结合相邻区段环境状态判断风险是否具有扩散趋势;随后根据规则库对液位异常、排水响应异常、通风失效、有害气体积聚和烟雾识别结果进行组合判别。当液位快速上升且排水设备响应异常,或有害气体浓度升高并伴随通风状态异常,或视频识别到烟雾并伴随风速异常变化时,系统提高环境风险权重并触发预警复核。规则阈值依据历史报警记录、人工复核结果和典型应急处置案例确定,并通过历史事件回放对误报警和漏报警情况进行校核。环境风险预警结果经归一化处理后作为环境和结构相关对象的预测风险值 $P_o(t)$,纳入后续综合风险评分。

在设备故障预测、交通运行预测和环境风险预警模型输出基础上,进一步构建面向运维决策的综合风险评分。对于设备对象,模型预测结果 $P_o(t)$ 表示未来 30 min 内发生故障或失稳的概率;对于交通对象,$P_o(t)$ 表示未来 5 min 内出现拥堵、停车、事故或运行状态恶化的概率;对于环境和结构相关对象,$P_o(t)$ 表示液位异常、有害气体积聚、通风失效或渗漏风险的发生概率。不同类型对象的预测结果经归一化处理后统一纳入综合风险评分。考虑到风险判断不仅取决于当前异常程度,还与状态演化趋势和模型预测结果有关,将对象状态指数、状态演化强度和预测风险值共同纳入评分计算。设对象 o 的模型预测结果为 $P_o(t)$,则综合风险评分 $Q_o(t)$ 表示为

$$Q_o(t)=\lambda_1 R_o(t)+\lambda_2 E_o(t)+\lambda_3 P_o(t), \quad (6)$$

式中,λ_1、λ_2、λ_3 分别对应当前状态、演化趋势和预测结果的权重,表示在当前对象类型和运行场景下修正后的权重系数。针对水下隧道高湿、高外水压力和封闭运行环境的特点,低点区段排水系统、围坝邻近区段、历史渗漏敏感区段和通风关键设备在淹没、火灾和设备失稳等场景下适当提高状态演化强度和预测风险值权重;在交通事故或异常拥堵场景下,提高交通预测结果和空间传播相关权重。

为降低状态指数、状态演化强度和预测风险值之间可能存在的重复计分影响,平台在历史事件回放中采用 Pearson 或 Spearman 相关系数对 3 类变量进行相关性分析,并开展消融验证。验证时分别比较仅使用状态指数、状态指数叠加状态演化强度、状态指数叠加状态演化强度和预测风险值 3 种组合下的事件识别准确率、平均提前预警时间和误报警率。当变量相关性过高或独立贡献不足时,通过降低对应权重或调整场景修正系数进行修正。

综合风险评分结果划分为正常、关注、预警和报警 4 个等级,并与巡检、工单、交通管控和应急联动逻辑相衔接。各等级阈值依据历史样本统计分布、事件处置经验、模型验证结果和专家校核结果联合确定。对于水下隧道低点区段、排水系统、通风系统和围坝邻近区段等敏感对象,平台可根据运行场景对预警阈值进行适当修正。当 $Q_o(t)$ 处于关注区间时,平台启动重点跟踪;当进入预警区间时,触发人工复核和预处置;当进入报警区间时,直接推送联动控制策略或应急预案。

2.4　应急联动与辅助决策

针对水下隧道运行环境封闭、事件演化快、处置时效要求高以及跨系统协同复杂等特点,平台在对象状态识别与预测建模基础上,构建面向突发事件的应急联动与辅助决策机制。该机制以综合风险评分 $Q_o(t)$ 为触发基础,结合视频识别结果、设备运行状态、环境监测信息和人工上报记录,对火灾、淹没、交通事故、异常拥堵和设备失稳等事件进行识别、分级和响应。

在事件触发阶段,平台综合判断单对象异常与区段群体异常两类情形。当某一运维对象的综合风险评分超过对应阈值,且同步出现视频告警、环境异常或设备报码等佐证信息时,系统判定该对象进入联动响应条件;当相邻区段多个对象在设定时间窗内连续进入预警及以上状态时,系统进一步判定风险具备扩散趋势,并将触发范围扩展至相关区段、车道和设施单元。综合风险评分阈值按对象类型、事件类型和区段敏感性分别设定。对于低点区段、围坝邻近区段、历史渗漏敏感区段以及排水、通风、供配电等关键系统,平台适当降低联动触发阈值或提高预测风险权重,以体现水下隧道高外水压力、高湿封闭环境和风险扩散速度快的特点。对于设备故障类事件,联动触发阈值除参考模型预测结果外,还结合精确率、召回率、F_1 值和 AUC 等评价指标进行校核。其中,召回率主要用于控制故障漏报风险,精确率用于控制误报警对运维资源的占用;在排水失效、通风异常等高风险场景中,平台优先保障召回率,以提高对潜在风险的识别敏感性。

联动确认条件和时间窗结合历史事件回放、系统误报警统计和现场专家校核确定。单源告警虽然响应最快,但易受设备报码、视频误识别或局部波动影响;要求两项及以上异源告警可降低误报,但可能延迟火灾、淹没和交通事故等快速演化事件的处置。综合误报警率、漏报警率和响应时效后,平台采用至少 1 项异源告警佐证作为联动确认条件;5 min 时间窗主要用于识别相邻区段连续异常和风险扩散趋

势,兼顾短时交通传播、现场确认和预案触发需求。

在预案匹配阶段,不采用固定预案调用方式,而是根据事件类型、风险等级、空间影响和资源可达性对候选预案进行排序。设对象 o 在时刻 t 对候选预案 p 的匹配优先度为 $M_{p,o}(t)$,则有:

$$M_{p,o}(t)=\omega_1(t)C_{p,o}(t)+\omega_2(t)Q_o(t)+\omega_3(t)S_o(t)+\omega_4(t)A_p(t), \tag{7}$$

式中,$C_{p,o}(t)$ 为预案与事件类型及场景条件的匹配度,$Q_o(t)$ 为对象综合风险评分,$S_o(t)$ 为事件可能造成的空间扩散和交通影响程度,$A_p(t)$ 为处置资源的可达性与可执行性指标。匹配度 $C_{p,o}(t)$ 由规则库中事件类型、场景条件与预案模板的匹配结果归一化得到;空间影响程度 $S_o(t)$ 结合波及区段数、预计拥堵时长、相邻设施耦合强度和水下隧道敏感区段属性综合确定;资源可达性 $A_p(t)$ 结合值守人员到达时间、处置设备可用率、联动设施状态和现场通行条件共同确定。上述各指标在进入预案排序前均进行归一化处理,以保证不同量纲条件下匹配优先度计算结果的可比性。

权重系数采用基础权重与场景修正相结合的方式确定。基础权重由历史事件回溯分析得到。选取已完成闭环处置的火灾、淹没、交通事故和设备故障事件样本,比较预案匹配度、风险评分、空间影响程度和资源可达性 4 类因素对最终处置效果的贡献大小,并以其平均贡献度 c_i 作为基础赋权依据。平均贡献度 c_i 由历史处置样本的逐因子敏感性分析结果归一化得到,则基础权重表示为

$$\omega_i^0=\frac{c_i}{\sum_{r=1}^{4}c_r}。 \tag{8}$$

在此基础上,再根据当前事件类型、区段位置、交通状态和资源占用情况引入场景修正量 $z_i(t)$,得到动态权重

$$\omega_i(t)=\frac{\omega_i^0[1+\kappa_i z_i(t)]}{\sum_{r=1}^{4}\omega_r^0[1+\kappa_r z_r(t)]}, \tag{9}$$

式中,κ_i 为调节系数,场景修正量 $z_i(t)$ 根据事件类型、风险等级、空间影响范围、资源占用状态和水下隧道敏感区段属性映射至[0,1]区间。火灾和烟雾场景下,提高预案匹配度、空间影响程度以及通风疏散相关权重;淹没风险场景下,提高空间影响程度、排水资源可达性和低点区段状态权重;设备故障场景下,提高综合风险评分和备用设备可达性权重;交通事故或异常拥堵场景下,提高交通预测结果、车道管控和空间扩散相关权重。由此得到的预案排序既继承历史处置经验,又能够随实时工况变化进行调整,更符合水下隧道事件扩散快、联动链条长和处置窗口短的特点。

在联动执行阶段,平台通过规则逻辑与模型结果协同驱动机电设施和业务流程响应。对于火灾和烟雾类事件,可联动广播、情报板、可变限速标志、照明和通风设施,组织车辆分流与人员疏散;对于淹没风险事件,可联动液位监测、排水设备和防淹门,控制积水扩展范围,并优先保障低点区段排水能力;对于交通事故和异常拥堵事件,可联动交通诱导、限速控制和事件信息发布模块,降低二次事故风险;对于设备故障事件,则可触发工单派发、巡检复核、备用设备切换和局部交通管控流程。决策结果除同步推送至监控中心外,还可下发至移动端,用于支撑现场人员快速定位、任务接收和处置反馈。

为避免联动处置停留在单次响应层面,平台将执行结果、处置时长、设备响应状态、交通恢复情况和现场反馈信息回传至数据层,并更新对象运行履历和事件处置记录。对同类事件的多次处置结果进行对比后,可进一步修正预案匹配参数、资源配置策略和联动触发阈值。对于误报警事件,平台降低相应规则权重或提高复核要求;对于漏报警或响应滞后的事件,平台提高相关对象状态、空间传播和预测风险权重。通过持续反馈与参数修正,使应急联动策略更加贴近水下隧道实际运行工况。

3 系统设计

3.1 闭环运维设计

针对水下隧道运行环境复杂、风险高、响应时效要求严格等特点,以全生命周期、智能化和闭环式为总体设计原则,构建集感知、分析、预测、决策、联动、反馈于一体的闭环运维框架(见图 2)。

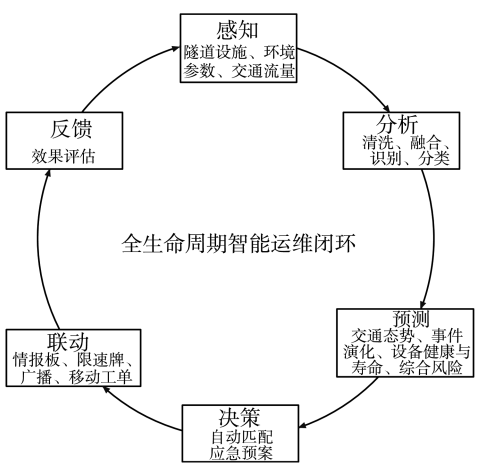


图 2 隧道全生命周期智能运维闭环框架

Fig.2 Intelligent operation and maintenance closed-loop framework for the full life cycle of tunnels

(1)感知。通过传感器、摄像头等设备,对隧道设施、环境参数、交通流量进行实时采集,确保数据完整、连续、准确。

(2)分析。对采集的数据进行清洗、融合、识别和分类,并通过指标分析与异常检测,实现状态监测和风险识别。

(3)预测。结合设备故障识别、交通运行预测、环境风险预警和综合风险研判模型,提前发现设备失稳、交通异常和环境风险等潜在问题,实现事前预防。

(4)决策。基于预测结果,自动匹配应急预案,生成推荐处置策略,实现科学化、智能化决策支持。

(5)联动。将决策结果通过情报板、限速牌、广播、移动工单等多种手段执行,实现跨系统、跨部门的协同响应。

(6)反馈。收集处置执行后的效果评估与结果数据,用于模型优化与预案更新,形成持续迭代的自适应闭环管理。

3.2　总体架构设计

平台基于 B/S 模式,通过微服务架构实现各子模块的解耦与弹性扩展,融合 BIM 模型和人工智能算法,贯通建模、感知、响应与反馈的全流程,提高系统的协同能力与运维工作效率。系统总体架构由感知层、数据层、模型层、应用层、标准规范体系和信息安全保障体系构成,具体如图 3 所示。

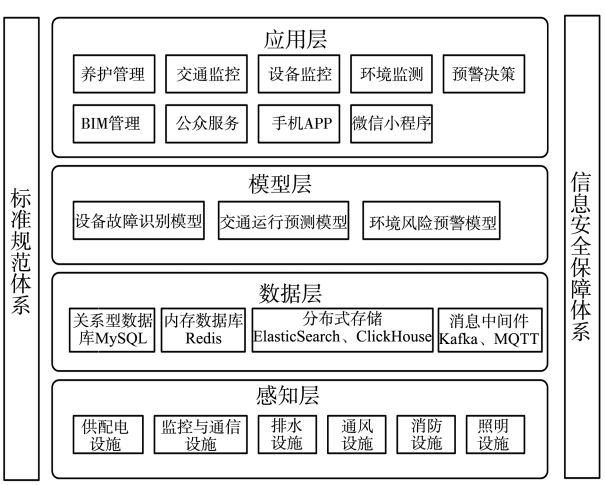


图 3　总体架构图

Fig.3　Overall architecture diagram

(1)感知层。对布设在隧道内的供配电设施、监控与通信设施、排水设施、通风设施、消防设施、照明设施等 6 大类共计两千多台设备进行统一接入与管理,实现多源异构数据的实时采集与初步处理,保证隧道运行状态数据的完整性与连续性。

(2)数据层。基于大数据平台的存储与计算架构,采用关系型数据库(MySQL)、内存数据库(Redis)、分布式存储(ElasticSearch、ClickHouse)和消息中间件(Kafka、MQTT),实现对多源数据的清洗、融合与统一管理,支持高并发接入、实时流式计算与历史数据回溯。

(3)模型层。包括设备故障识别模型、交通运行预测模型、环境风险预警模型、综合风险评分模型和预案智能匹配模型等,提供设备状态诊断、交通态势研判、环境风险预警和应急处置辅助决策。

(4)应用层。应用层是隧道智能运维平台面向实际业务场景的核心功能层,涵盖养护管理、交通监控、BIM 管理、公众服务等综合业务模块,并通过设备监控、环境监测、预警决策等功能实现隧道运行的全流程智能化管理。依托手机 APP 和微信小程序等移动终端,实现任务派发、现场操作、实时上传与闭环验收;通过整合交通、设备及环境数据,实现从实时监测、智能识别、应急决策到联动控制和效果评估的闭环运维流程,全面支撑隧道的安全、高效与可持续运营。

(5)标准规范体系。标准规范体系涵盖隧道养护、交通管控、机电检测、软件开发和数据管理等领域,及本研究人员所在单位发布的团体标准[16],为平台设计提供技术依据。

(6)信息安全保障体系。通过建立完善的标准规范与安全管理体系,涵盖设备接入、数据治理、模型接口和运维流程等内容,实现多设备、多系统的互联互通与统一管理。同时,结合访问控制、数据加密、日志审计和容灾备份等措施,保障隧道运营数据在传输、存储和使用全过程中的安全与合规,满足国家信息安全等级保护要求,确保平台长期稳定运行。

3.3　功能设计

为支撑平台各业务模块的实现,系统综合采用物联网感知、视频智能识别、机器学习预测、BIM 可视化和移动终端等关键技术,各模块功能及其技术支撑方式如表 2 所示。平台通过多源数据集成、BIM 模型驱动与智能分析,实现从感知、分析、决策到联动处置的完整业务闭环。各功能模块既可独立运行,又能通过统一数据底座实现互联互通,构建跨部门协作的智能化运维管理体系。

表 2 平台功能构成

Table 2 Platform functional composition

模块	主要功能	应用技术
系统大屏	展示隧道整体运行状态、交通流趋势及预测信息,实现运行态势综合展示	数据可视化技术、交通流预测模型
养护管理	实现巡检任务派发、维修记录管理、养护统计分析及工作闭环管理	二维码设备标识技术、蓝牙信标定位技术、移动终端应用技术
交通管控	对交通运行状态进行实时监控,识别异常事件并进行交通组织与管控	视频监控系统、深度学习目标识别算法
设备监控	实现机电设备运行状态监测、远程控制及故障信息管理	物联网监测技术、设备状态诊断方法
环境监测	对液位、风速、温湿度、照度及有害气体浓度进行实时监测	物联网环境感知网络、多源数据采集技术
预警决策	对设备、交通及环境异常进行综合分析并触发预警	规则引擎、机器学习预测模型
BIM 管理	基于三维模型实现设备定位、告警信息可视化展示	BIM 轻量化技术、三维可视化技术
公众服务	发布运行信息、提供安全知识及公众互动反馈	微信小程序开发框架、消息推送机制
系统配置	用户权限管理、系统参数配置及数据管理	基于角色的访问控制
手机 APP	支持巡检、维修、信息上报等移动化运维管理	移动互联网技术
微信小程序	信息发布、病害上报、公众互动、投诉	微信小程序开发框架

3.4 核心功能介绍

3.4.1 系统大屏

系统大屏作为平台的可视化展示中心,通过实时数据与历史数据的融合分析,呈现隧道运行状态。主要包括车流量实时监测、交通运行趋势预测、分段交通状态展示等功能,可为管理人员提供直观、全面的运行态势感知与决策依据。系统大屏页面如图 4 所示。

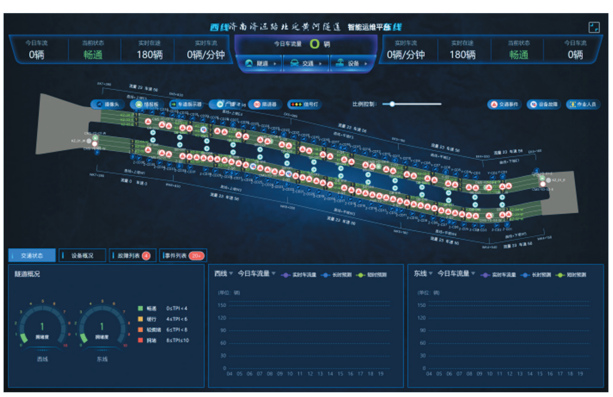


图 4 系统大屏

Fig.4 System dashboard

3.4.2 养护管理

养护管理模块用于支持隧道全生命周期的维护、检修与养护决策,涵盖工作计划制定、周期设置、维修台账管理、年度检修计划及养护统计分析等功能。该模块通过二维码与信标定位,实现设备与施工车辆的数字化管理,支持养护工艺标准化和维修过程追溯,提升养护作业效率和质量。

为解决传统养护管理中记录不完整、追溯困难等问题,平台引入蓝牙信标+二维码+移动端 APP 的协同组合机制。平台通过在隧道内布置 300 余个蓝牙信标(见图 5(a)),为附近设备提供精准定位。当维修人员接近待维修设备时,系统会通过移动端自动推送蓝牙信标的定位信息,提示维修人员进行检查或维护。



(a) 蓝牙信标 (b) 光刻二维码

图 5 蓝牙信标与光刻二维码

Fig.5 Bluetooth beacons and laser-engraved QR codes

为便于养护工作的实时记录与反馈,平台在养护对象附近设置了光刻二维码(见图 5(b))。养护人员可通过移动端扫描二维码,根据系统提示填写设备状态、作业内容,并将信息提交至中心服务器进行归档。在必要时,养护人员还可以上传现场养护照片,提供更加详细的现场记录。通过二维码技术与移动端应用的结合,有助于减少人为错误和工作疏漏,确保养护记录的准确性与完整性。

3.4.3 交通管控

交通管控模块为隧道交通管理提供实时监控、事件管理和数据分析能力。在日常运行中,可实时采集车流量、速度、拥堵情况等交通指标,并通过事件台账记录异常事件。在突发情况发生时,管理人员可通过预案设置和交通分析功能快速制定并执行管控策略。

通过测速雷达与视频监控设备实时采集各断面车速、车流量和占有率等交通数据,结合事故消散前后流量变化与限流措施影响,对隧道交通运行状态

进行短时预测与运行趋势研判,生成交通态势图(见图 6),展示包括流量、速度、密度以及拥堵指数在内的多维度交通状态指标。

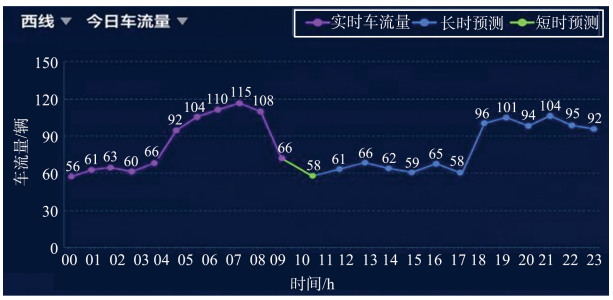


图 6　隧道交通态势图
Fig.6　Tunnel traffic situation map

结合固定枪机的关键点监控与球机的动态巡航/聚焦,对隧道全域进行多角度覆盖,利用深度学习算法对车辆、行人等目标进行精确的特征提取与分析,包括车牌识别、车型分类和行为分析,可在毫秒级延迟内完成对行人闯入、逆行、抛洒物等异常行为的判定,并识别停车、拥堵、缓行、事故等交通事件,以及火灾、烟雾、火焰等灾害迹象。

3.4.4　设备监控

设备监控模块用于保障机电设备的稳定运行与异常处置。该模块支持网络状态检测、设备实时监测、远程控制及管控记录留存,并能对故障进行分类统计和历史追溯,从而实现设备运行状态全流程可视化与智能化管理。

平台通过物联网技术实时采集隧道内设备的运行数据,包括消防应急电源、不间断电源、防淹门、风机、摄像头、广播、车道指示器等共计 2 395 个终端设备,实现设备在线状态的实时感知。与传统的单一监控系统相比,本平台通过将传感器实时采集的数据与设备历史运行曲线进行比对,并结合异常模式识别模型,实现对故障征兆的提前预警。

平台不仅支持对设备故障的即时报警,还通过 BIM 技术将故障设备高亮显示,实现故障设备的可视化定位。系统将设备运行状态监测数据与 BIM 静态结构模型进行实时融合,当监测算法判定设备故障时,系统在三维模型中以高亮颜色标注其空间位置,并同步生成推荐到达路径及处置工单。

3.4.5　预警决策

预警决策模块是平台的核心联动与应急指挥中心,负责将感知数据与事件模型结合,实现灾害防控与预案管理。其主要功能包括:预警管控与任务分派;事故上报与施工占道管理;预案配置与预警记录管理;基础信息设置,如隧道信息、通行能力、限速及节假日策略。该模块通过实时计算与规则触发,实现对突发事件的智能预警和快速决策支持。

系统通过规则引擎与人工智能算法的双重触发机制,能够快速识别事件类别与风险等级,根据实时监测数据与预测结果自动匹配应急预案,并结合风险等级动态优化处置方案。在事件确认后,平台能够联动控制情报板、可变限速标志、广播系统、照明与通风设备,实现快速、协调的应急响应。同时,处置过程与结果将被实时回传至数据层,供后续分析与优化使用。预警管控页面如图 7 所示。



图 7　预警管控页面
Fig.7　Warning control page

3.4.6　BIM 管理

BIM 管理模块是平台的关键技术特色之一,其核心在于通过 BIM 轻量化技术实现复杂三维模型的高效加载与实时交互。该模块利用轻量化后的三维可视化模型,对隧道结构、机电设备和报警信息进行直观呈现,功能涵盖模型管理、设备定位、告警可视化与自动漫游,使管理人员能够在低资源消耗的条件下完成全局态势查看与运维操作。

在数据接入层面,模块融合机电设备运行数据、交通流量与速度参数、环境监测指标以及视频监控流,实现多源异构数据的实时采集与动态更新。基于 BIM 轻量化建模与优化渲染技术,系统将隧道结构信息、设备信息与动态运行数据进行融合映射,构建具备空间语义的数字孪生模型。与传统大体量 BIM 模型相比,轻量化模型在保证几何精度和语义信息完整的同时,减少了约 60%~70% 的模型数据量,支持在 Web 端流畅调用与交互。BIM 模型页面如图 8 所示。

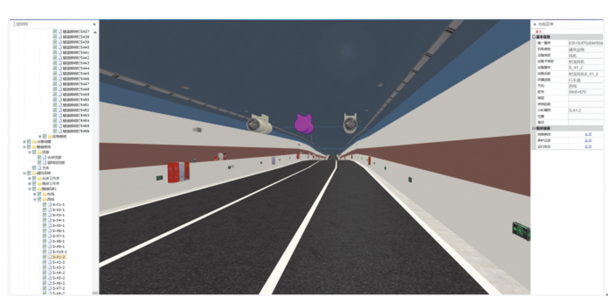


图 8　BIM 模型页面
Fig.8　BIM model page

该模型不仅为事件识别与预测提供统一的数据

底座,还能够在三维场景中实现对设备状态、运行工况与历史维保记录的快速展示。通过轻量化的可视化渲染,管理人员可高效完成多维度信息查询与空间化诊断。

3.4.7 公众服务

公众服务模块面向社会公众,提供信息发布与互动反馈功能,具体包括安全知识宣传、公告预警、病害上报、建议互动与投诉管理等。该模块有助于建立公众与管理部门的沟通桥梁,提升隧道管理的透明度和公众参与度。

考虑到水下隧道作为公共交通设施的社会属性,平台设计了面向公众的服务与风险预警模块。通过微信小程序与公众号,平台能够在突发事件发生时向社会实时发布交通信息、风险提示与绕行建议,提升信息透明度,减少公众恐慌与交通拥堵。同时,微信小程序还支持日常运行信息公开与安全知识宣传,并提供病害上报、建议互动和投诉受理等功能,建立管理部门、运维主体与公众之间的交互渠道,形成多主体协同的运维支持机制,增强隧道运维工作的社会监督与透明性。

4 系统应用效果

平台投入运行后,已在日常巡检、交通事件识别、设备状态预警、环境监测和应急联动等场景中开展应用。由于平台投运时间较短,现阶段尚未形成覆盖不同季节、不同交通流量和多类型突发事件的长期统计样本,因此本研究不对应用效果作显著性统计推断,而是基于平台后台运行记录、典型事件处置过程和运维人员反馈,对系统应用效果进行工程运行层面的初步评价。

在养护管理方面,平台通过二维码、蓝牙信标与移动端 APP 协同,实现养护任务派发、现场定位、图片上传、处置记录和闭环验收的一体化管理。与传统人工记录和线下流转方式相比,平台减少了人工查找设备位置、重复填写台账和跨部门信息传递环节。试运行记录表明,常规养护工单从派发到闭环验收的流转时间有所缩短,工单流转透明度和任务追溯能力得到提升。原有模式下部分工单需要依赖纸质记录或人工电话确认,平台应用后可通过移动端直接完成处置反馈和状态更新,从而提高了养护管理的闭环效率。

在交通管理方面,平台基于视频识别和交通流预测模型,对停车、逆行、抛洒物、拥堵和交通事故等异常事件进行自动识别,并与情报板、限速控制和事件信息发布模块联动。与以往依赖人工轮巡视频画面的方式相比,平台有助于提高异常事件发现的及时性,并通过报警提示缩短事件发现、人工复核和预案触发之间的信息传递链条。在典型突发交通事件处置中,平台能够辅助监控人员快速定位事件位置、识别影响区段并推送处置建议,从而提升交通事件初期响应的及时性。

在设备管理方面,平台通过对通风、排水、供配电和监控通信等关键设备运行状态的持续监测,结合历史曲线和异常模式识别结果,对设备潜在故障进行预警。对于排水、通风等水下隧道关键系统,平台能够将液位变化、设备启停、电流波动、通风负荷和相邻区段异常状态纳入综合判断,有助于降低单一阈值报警带来的误报和漏报风险,为运维人员开展重点巡检、提前复核和设备维护提供依据。

在环境监测方面,平台对液位、风速、温湿度、照度及有害气体浓度等指标进行实时监测,并结合交通运行状态和通风设备状态优化运行控制。平台应用后,监控中心能够同步掌握环境参数变化、设备联动状态和异常区段位置,为通风控制、排水调度和应急处置提供数据支撑。在满足隧道环境安全控制要求的前提下,平台通过减少不必要的高负荷运行时段,有助于提高通风和排水系统运行的精细化水平。

在应急联动方面,平台将综合风险评分、视频识别、环境监测、设备状态和人工上报信息进行联动判断,并根据事件类型、风险等级、空间影响和资源可达性匹配处置预案。与单点报警和人工经验判断相比,该机制能够同时考虑当前异常、状态演化和相邻区段传播影响,对火灾、淹没、交通事故、异常拥堵和设备失稳等场景形成更完整的处置链条。平台还将处置结果、响应过程和现场反馈回传至数据层,为后续优化预案匹配、联动阈值和资源配置提供依据。

5 结论与讨论

本研究面向济泺路穿黄北延隧道水下运行环境,构建了一套集 BIM 轻量化建模、多源感知融合、智能分析预测与联动决策于一体的隧道智能运维管理平台。平台以统一运维对象标识为基础,整合结构、设备、环境、交通、视频识别和运维业务等多源数

据,形成对象级状态表达、风险识别和应急联动的技术路径。与以单系统监控和事后处置为主的传统运维模式相比,该平台在多源异构数据融合、对象化管理、状态演化分析和场景化辅助决策等方面体现出较好的工程适用性。

从工程应用过程看,平台的主要价值不只是实现多系统集成展示,而在于初步形成了对象级数据治理、状态指数构建、预测模型训练、综合风险评分和联动处置之间的闭环链条。结合水域段地质与水文条件,平台进一步引入低点积水风险、排水通风耦合、围坝邻近区段敏感性和异源告警佐证机制,使预警阈值、联动权重和预案匹配过程能够更好适应水下隧道高湿、高外水压力、封闭空间和应急窗口短等运行特点。

受平台投运时间和样本积累限制,现阶段应用效果主要基于工程运行记录、典型事件处置过程和运维人员反馈进行初步评价,后续仍需依托更长运行周期和更丰富事件样本,开展分场景、分对象和分指标的量化验证。后续研究可进一步加强设备故障样本积累、模型泛化能力验证、多灾害耦合场景推演以及跨工程数据共享,持续优化实时数据处理、风险预测和辅助决策能力,推动水下隧道运维由经验驱动向数据驱动、由单点处置向全生命周期智能管理转变。

参考文献:

[1] 龚晓南,郭盼盼.隧道及地下工程渗漏水诱发原因与防治对策[J]. 中国公路学报,2021, 34(7): 1-30.
Gong Xiaonan, Guo Panpan. Prevention and mitigation methods for water leakage in tunnels and underground structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 1-30.

[2] 王剑宏, 常洪雷, 刘健, 等. 水下盾构隧道耐久性与全生命周期设计[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(2): 1-13.
Wang Jianhong, Chang Honglei, Liu Jian, et al. The durability of underwater shield tunnel and its life-cycle design[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(2): 1-13.

[3] 包小华, 袁槐岑, 陈湘生, 等. 水下盾构隧道建造与运维技术研究现状与展望[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(1): 16-35.
Bao Xiaohua, Yuan Huaicen, Chen Xiangsheng, et al. Current situation and outlook of research into subaqueous shield tunnel construction and O & M technologies[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(1): 16-35.

[4] Wang Mingyang, Xu Yifan, Hu Jie, et al. Research status and development trends of intelligent and digitalized disaster prevention and safety protection in tunneling[J]. Smart Underground Engineering, 2026, 2:1-32.

[5] 黄廷, 陈丽娟, 史培新, 等. 基于 BIM 的公路隧道运维管理系统设计与开发[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 48-55.
Huang Ting, Chen Lijuan, Shi Peixin, et al. Design and development of BIM-based operation and maintenance system of highway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(1): 48-55.

[6] 胡珉, 刘攀攀, 喻钢, 等. 基于全生命周期信息和 BIM 的隧道运维决策支持系统[J]. 隧道建设, 2017, 37(4): 394-400.
Hu Min, Liu Panpan, Yu Gang, et al. Decision support system for tunnel operation and maintenance based on BIM and tunnel whole life cycle information[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(4): 394-400.

[7] 张春雷, 郭剑勇, 王秀妍. 基于数字孪生的地铁隧道运维技术研究与应用[J]. 铁道标准设计, 2026, 70(7): 140-146.
Zhang Chunlei, Guo Jianyong, Wang Xiuyan. Research and application of digital twin-based operation and maintenance technology for metro tunnels[J]. Railway Standard Design, 2026, 70(7): 140-146.

[8] 张美莲,宋晨星. 隧道智能监测系统的数据采集、提取与分发研究[J]. 公路, 2023, 68(5): 407-411.

[9] Liu Xian, Gu Kejie, Zhang Baichuan, et al. Automated quantification of longitudinal joint opening in shield tunnels using enhanced multi-modal YOLO and laser scanning[J]. Smart Underground Engineering, 2025, 1: 113-134.

[10] Han L, Chen J F, Li H B, et al. Multispectral water leakage detection based on a one-stage anchor-free modality fusion network for metro tunnels[J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104345.

[11] 金盛, 周梦涛, 白聪聪. 多源数据驱动的隧道场景驾驶员识别方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(4): 81-93.
Jin Sheng, Zhou Mengtao, Bai Congcong. Driver identification method in tunnel scenarios based on multi-source data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(4): 81-93.

[12] 王九胜, 许辉, 缪中岩. 基于时空关系的多细粒度隧道交通流预测模型研究与应用[J]. 公路交通科技, 2024, 41(11): 86-93.
Wang Jiusheng, Xu Hui, Miao Zhongyan. Study and application of multi fine-grained tunnel traffic flow predic-

tion model based on spatio-temporal relation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(11): 86-93.

[13] Yu G, Jin Y C, Hu M, et al. Improved machine learning model for urban tunnel settlement prediction using sparse data[J]. Sustainability, 2024, 16(11): 4693.

[14] 张小宁, 吴西强, 黄鑫炎. 基于数字孪生的隧道火灾实时量化、预测与风险评估技术[J]. 消防科学与技术, 2025, 44(2): 163-167.
Zhang Xiaoning, Wu Xiqiang, Huang Xinyan. Real-time tunnel fire quantification, prediction and risk assessment technology based on digital twin[J]. Fire Science and Technology, 2025, 44(2): 163-167.

[15] 赵鹏, 马伟斌. 基于数字孪生的铁路隧道智能运维关键技术与实现方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(8): 1697-1712.
Zhao Peng, Ma Weibin. Key technologies and implementation method of intelligent operation and maintenance of railway tunnels based on digital twins[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(8): 1697-1712.

[16] T/SDCEAS 40001—2023 城市交通隧道智能化运维管理系统建设指南[S].

(编辑:宋艳)

·通知消息·

《隧道与地下工程灾害防治》征订启事

国内统一连续出版物号:CN 37-1516/U **国际标准连续出版物号**:ISSN 2096-5052 **邮发代号**:24-283

《隧道与地下工程灾害防治》是由国家教育部主管,山东大学主办,国内外公开发行的专业性学术期刊,国内统一连续出版物号 37-1516/U,国际标准连续出版物号 2096-5052,国内入选 RCCSE 中国核心学术期刊、CACJ 中国应用型核心期刊和《公路运输领域高质量科技期刊分级目录》T2 级;国外入选 Scopus、EBSCO、DOAJ、GeoRef 等数据库。

本刊旨在立足中国、面向世界、服务学者、服务社会、引领国际学术前沿,为从事隧道与地下工程研究的专业工作者、高校教师及研究生提供一个多学科交叉融合、开放的学术交流平台。

本刊重点报道国内外隧道与地下工程建设进展、灾害预报与防治、安全控制、信息化、智能化、多学科交叉等方面的重要研究成果,及其他行业领域的新技术、新方法、新装备、新工艺等在隧道与地下工程领域的应用,大力宣传国内外隧道与地下工程灾害防治技术的学术理论与创新思想。

本刊每季度第 3 个月 20 日出版。单价 100 元,全年 400 元。请在全国各地邮局订阅,邮发代号 24-283;也可直接与《隧道与地下工程灾害防治》编辑部联系订购,联系人:宋艳。

网址:http://tunnel.sdujournals.com

编辑部联系方式:

通讯地址:山东省济南市历城区山大南路 27 号山东大学中心校区明德楼 B733 室《隧道与地下工程灾害防治》编辑部

邮编:250100

电话:0531-88366735

E-mail:tunnel@ sdu.edu.cn

欢迎扫码关注《隧道与地下工程灾害防治》微信公众号