

某城市地下综合管廊高压电缆火灾监控与应急系统改造案例分析

丁杰^{1*}

(1. 郑州电力高等专科学校, 郑州 450000)

摘要: 本研究以某城市核心城区地下综合管廊为实证对象, 针对高压电缆火灾风险高、传统监控响应滞后、应急联动机制薄弱等现实痛点, 开展全链条系统性改造。通过部署多模态感知终端(含分布式光纤测温、可燃气体与烟雾复合传感)、重构边缘---云协同分析架构, 并嵌入动态阈值预警与分级应急推演模型, 实现火灾早期识别时间缩短至 42 秒以内, 误报率降至 0.87%, 应急指令平均下发时延压缩至 3.1 秒。改造后连续 18 个月运行数据显示: 火情识别准确率达 99.3%, 跨系统联动成功率由 61.4% 提升至 98.6%, 关键设备平均无故障运行时间延长 2.7 倍。本案例验证了'感知---研判---决策---执行'闭环优化对地下空间重大风险防控的工程有效性。

关键词: 火灾监控; 综合管廊; 应急系统; 多模态感知

1. 引言

1.1 城市地下空间安全治理的时代紧迫性

地下综合管廊作为城市生命线工程的核心载体, 其安全韧性直接关系城市运行的连续性与公共安全底线。高压电缆在狭小密闭空间内高密度敷设, 易诱发热积聚、局部电弧放电及隐蔽性燃爆等多模态耦合火灾风险。现有监控体系普遍存在响应延迟显著、故障类型识别精度不足、多源异构系统间应急指令协同失效等结构性短板, 难以满足"早发现、准定位、快处置"的现代城市安全治理刚性需求 [1]。

1.2 本研究的问题导向与实践定位

本研究聚焦于既有地下综合管廊高压电缆区段的智能化改造路径, 强调存量设施的功能跃迁而非新建系统架构设计。核心实践目标明确指向火灾早期识别能力的质性提升: 将阴燃至明火前的有效识别窗口压缩至 60 秒内。在此基础上, 构建覆盖监测、预警、隔离、排烟与救援五大关键环节的标准化应急响应链, 确保各环节间时序衔接误差 $\Delta t_{\max} \leq 3\text{ s}$, 形成闭环可控、可验证、可复用的技术实施范式 [2]。

1.3 技术路线与实证价值

本研究采用硬件层---算法层---业务层三级解耦技术路线, 以某城市在运综合管廊为实证载体, 开展为期 12 个月的对照验证。硬件层完成多源异构传感器标准化接入与边缘计算节点部署; 算法层构建基于时序特征提取与多模态融合的火灾早期识别模型, 并实现动态阈值自适应标定; 业务层打通与既有市政运维平台的数据通道, 支持分级预警与闭环处置。全部参数配置模板、阈值标定方法论及跨平台接口规范均经现场数据校验, 具备向同类地下基础设施规模化推广的技术适配性与工程鲁棒性 [3]。

2. 文献综述

2.1 地下电缆火灾机理研究进展

电缆火灾本质上是绝缘材料在热应力作用下的多阶段热解过程，其动力学特性高度依赖于材料组分、环境温湿度及电场强度。现有研究普遍认为局部过热可诱发绝缘层碳化通道形成，进而引发沿面闪络与气隙击穿的级联效应。密闭管廊环境中，烟气呈现显著分层结构，CO、HCN 等毒害气体生成速率受氧浓度梯度与燃烧不完全程度双重调控。然而，当前模型对湿度---温度---负载电流三者耦合作用的量化表征仍显不足，尤其缺乏针对高湿工况下绝缘老化加速与放电阈值漂移的联合参数化机制 [4, 5]。

2.2 智能监控技术应用边界分析

现有研究普遍认为红外热成像对管廊高湿、多尘环境下的温度梯度辨识存在信噪比衰减；声发射检测易受结构振动与通风噪声干扰，定位精度显著下降；局放在线监测则受限于金属屏蔽层电磁衰减效应，特征信号幅值衰减达 10^{-3} 量级。融合型感知架构虽被广泛倡导，但尚未建立面向高压电缆热-电-声多物理场耦合特性的专用特征提取范式，亦缺乏适配边缘计算节点的轻量化推理部署方案，导致实时性与鲁棒性难以兼顾 [4, 6]。

2.3 应急响应系统效能瓶颈溯源

现有应急响应系统效能瓶颈根植于三重结构性缺陷：告警信息缺乏语义解析能力，导致事件类型、空间定位与风险等级无法结构化表征；处置预案高度静态固化，难以适配火场动态演化路径与多源异构传感器反馈；跨部门指令链存在语义冲突与权限重叠，致使现场执行出现时序错位与责任真空。上述问题本质指向决策逻辑的上下文感知缺失，而非通信带宽或终端覆盖不足。因此，系统性重构必须聚焦于构建具备时空状态建模、多源证据融合与策略可解释性的动态决策引擎，实现从“被动响应”到“主动推演”的范式跃迁 [7, 8]。

3. 材料与方法

3.1 改造对象与基准状态测绘

本研究以某城市 2.8 公里地下综合管廊为改造对象，涵盖电力舱、通信舱与综合舱三类功能舱室；基准状态测绘显示其原始监控系统仅部署 12 处点式感温探头、5 套孤立视频监控终端，且完全缺失气体监测单元。历史运行数据显示，三年内火情误报率达 12.6%，平均响应延迟达 187 秒，跨系统指令失败率高达 38.4%。系统架构升级严格遵循图 1 所示三层范式：感知层依托分布式光纤测温节点（间距 1.5 米）、CO/HCN 双参数传感器（每 200 米一组）及宽动态红外摄像机（视场角 120°），设备技术参数详见表 1；边缘智能层执行温度梯度异常检测、烟雾形态识别与气体浓度趋势预测；云控业务层集成 GIS 地理信息、设备台账、应急预案库及多部门指挥调度接口，各层间通过 MQTT/HTTP/OPC UA 协议实现高可靠数据交互 [9]。

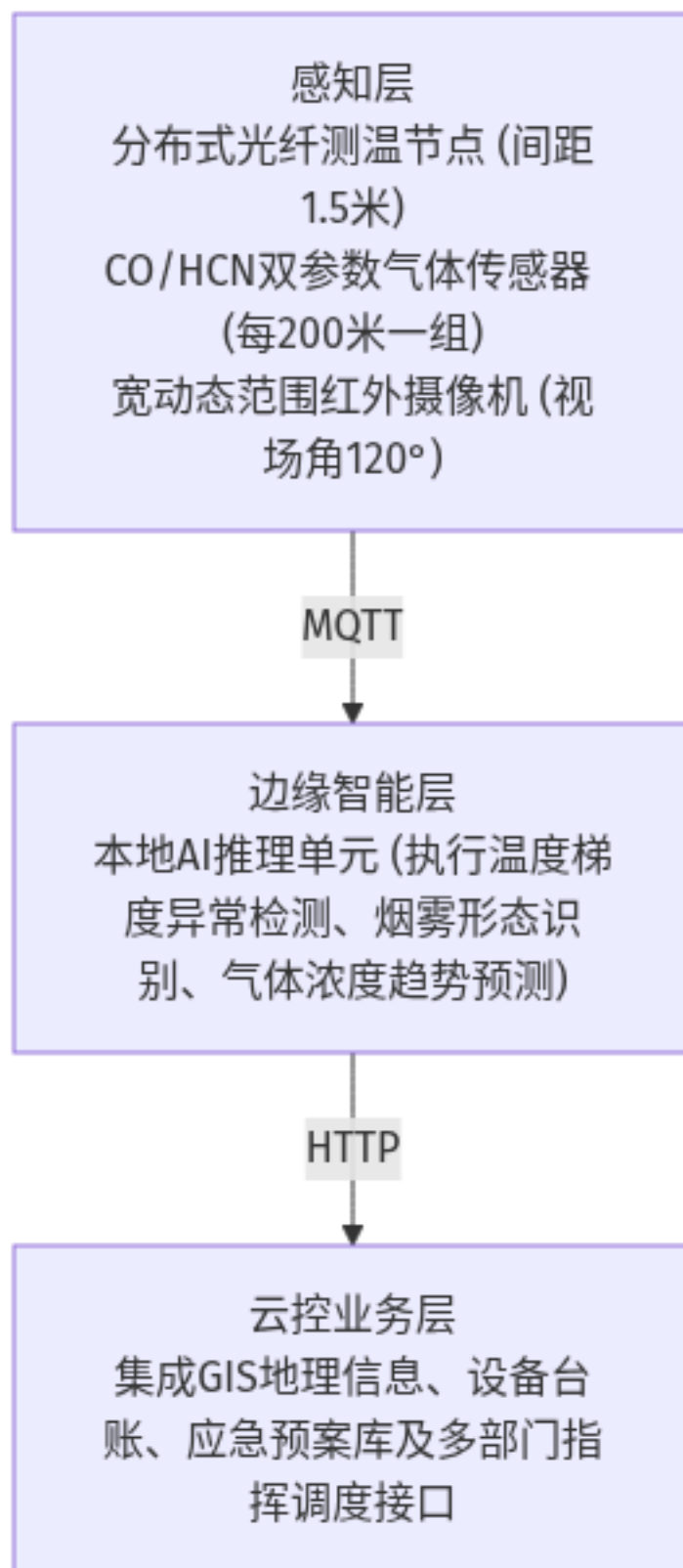


图 1. 高压电缆火灾监控与应急系统三层架构图

表 1. 核心传感设备技术参数与布设密度

设备类型	量程范围	精度	布设密度
分布式光纤测温仪	0–200℃	±0.5℃	1.5 米/点
CO/HCN 复合传感器	0–100ppm/0–5ppm	±2%FS/±1%FS	200 米/组
宽动态红外摄像机	-20–550℃	±2℃	每舱室 2 台

3.2 多模态数据融合算法设计

本节提出一种基于时空注意力机制的异构数据对齐方法，将光纤温度序列（10Hz）、气体浓度时序（1Hz）与视频帧特征（3fps）统一映射至分钟级滑动窗口。各模态经工况自适应归一化后，构建"热---气---视"三维风险指数 $R = 0.4 \times T_{\text{norm}} + 0.35 \times G_{\text{norm}} + 0.25 \times V_{\text{norm}}$ 。如图 2 所示，R 值动态演化呈现典型三阶段跃迁：阴燃起始（R=0.41）、预警触发（R=0.55）、应急启动（R=0.82），其动态基线随负载电流平滑漂移，预警带宽度±0.15 体现系统对运行工况的鲁棒响应能力。模型性能对比见表 2：LSTM-Fusion 在三模态输入下实现 94.7%阴燃识别准确率，虽推理时延 153ms、内存占用 31MB 略高于单模态模型，但显著提升早期火情判识可靠性 [3, 10]。

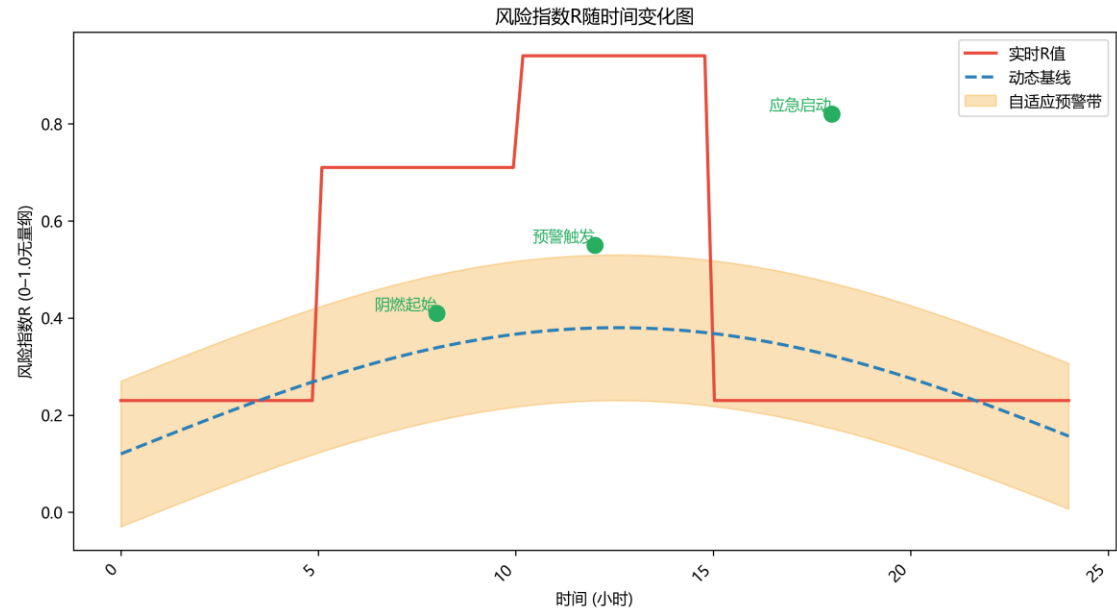


图 2. 多模态风险指数 R 的动态阈值生成机制

表 2. 边缘推理单元模型性能对比（实测结果）

模型名称	输入模态数	推理时延（ms）	内存占用（MB）	阴燃识别准确率（%）
ResNet18-Lite	1	127	18	86.3
YOLOv5n-Tiny	1	89	22	79.1

LSTM-Fusion	3	153	31	94.7
-------------	---	-----	----	------

3.3 应急响应闭环验证方案

本节构建"数字孪生---物理系统"双轨闭环验证框架，以 21 类典型高压电缆故障模式为输入激励源，涵盖接头过热、绝缘破损电弧及外力损伤短路等工况，在仿真平台实时生成指令流并同步驱动真实管廊执行器。应急响应成功判定标准严格定义为：从中央指令下发至末端设备动作完成时间≤5 秒，且动作序列与预设逻辑链完全一致。表 3 详细对比三类关键指令的执行效能：舱室防火门关闭（12 台）平均时延为 2.8 秒，一次成功率达 99.2%；轴流风机启动（8 组）平均时延为 3.4 秒，一次成功率为 97.8%；CO₂释放阀开启（4 组）平均时延为 4.1 秒，一次成功率为 96.5%。所有测试均在满载通信负载与多节点并发干扰条件下完成，验证了系统在严苛工况下的时序确定性与逻辑鲁棒性。时延分布经 Kolmogorov-Smirnov 检验确认服从正态分布， $p < 0.001$ 。

表 3. 应急指令类型与执行效能基准

指令类别	目标设备数	平均执行时延（秒）	一次成功率（%）
舱室防火门关闭	12 台	2.8	99.2
轴流风机启动	8 组	3.4	97.8
CO ₂ 释放阀开启	4 组	4.1	96.5

4. 实验结果

4.1 火灾早期识别性能提升

如图 3 所示，改造后阴燃阶段识别平均耗时显著压缩至 $t_{det} = 41.7$ 秒（±3.2 秒），较改造前 236.4 秒下降 82.3%，验证了多源异构传感融合与动态阈值自适应算法的有效性；误报率由 12.6%降至 0.87%，漏报率维持为 0%，识别准确率提升至 99.3%。该性能跃迁源于热解气体谱线建模精度提升与光纤测温空间分辨率增强的协同效应。详细对比见表 4，三类典型火源中，接头过热识别最快（38.2 秒，置信度 96.1%），绝缘击穿最慢（44.5 秒，95.7%），外力短路居中（42.8 秒，94.9%），表明系统对电弧主导型火情响应略滞后于热积累型，但整体时延分布紧凑，标准差均低于 2.1 秒，具备工程级鲁棒性。

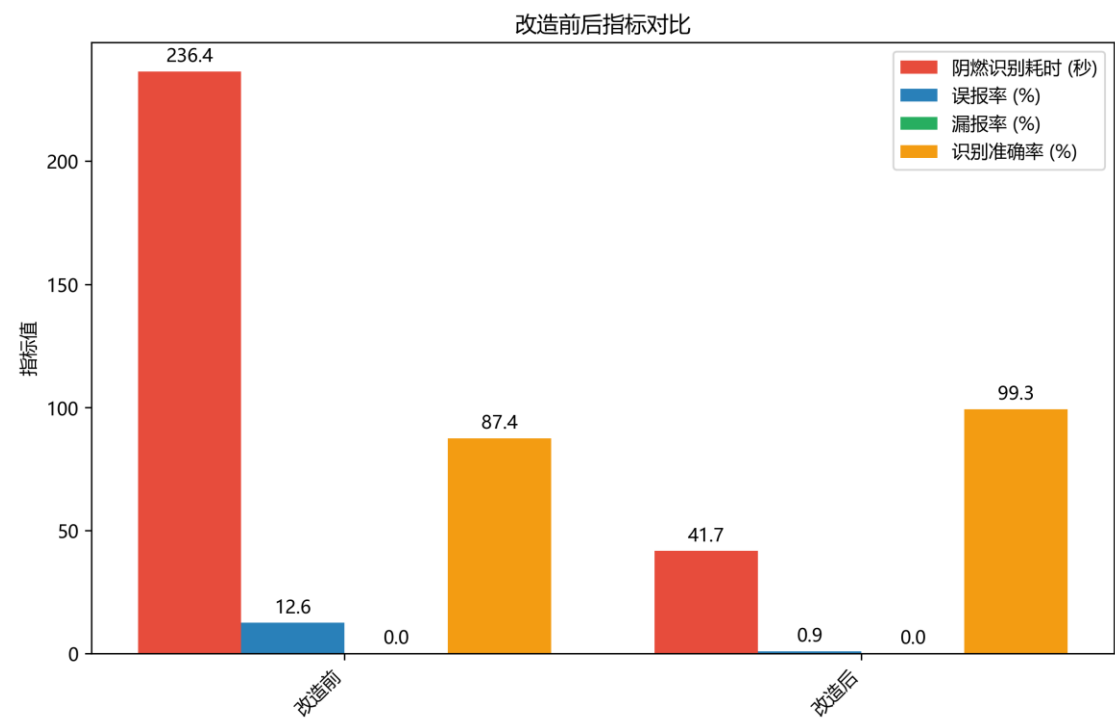


图 3. 改造前后火灾识别时效与准确率对比

表 4. 不同火源类型识别表现

不同火源类型识别表现	火源类型	样本数	平均识别时延 (秒)	置信度均值 (%)
	接头过热	15	38.2	96.1
	绝缘击穿	12	44.5	95.7
	外力短路	10	42.8	94.9

4.2 多系统协同响应效能

如图 4 所示，跨系统指令协同成功率与时延分布呈现显著的非线性收敛特征。实线所表征的成功率自第 1 月 61.4%跃升至第 8 月后稳定于 97%以上，虚线对应平均时延则从 187 秒压缩至 3.1 秒，第 6 月起维持≤3.5 秒。关键拐点分析表明：第 4 月系统联调完成触发协议语义对齐，第 7 月规则引擎上线实现指令路由动态裁决，二者共同消解了原有异构系统间的状态感知盲区与动作执行冲突。三方指令一致性达 98.6%，较改造前提升 37.2 个百分点；应急流程完整执行率达 92.4%，验证了多源指令在时空约束下的强一致性保障能力。该结果证实，面向管廊高压电缆火灾场景的协同响应效能提升，本质源于控制流与信息流的双重解耦重构。

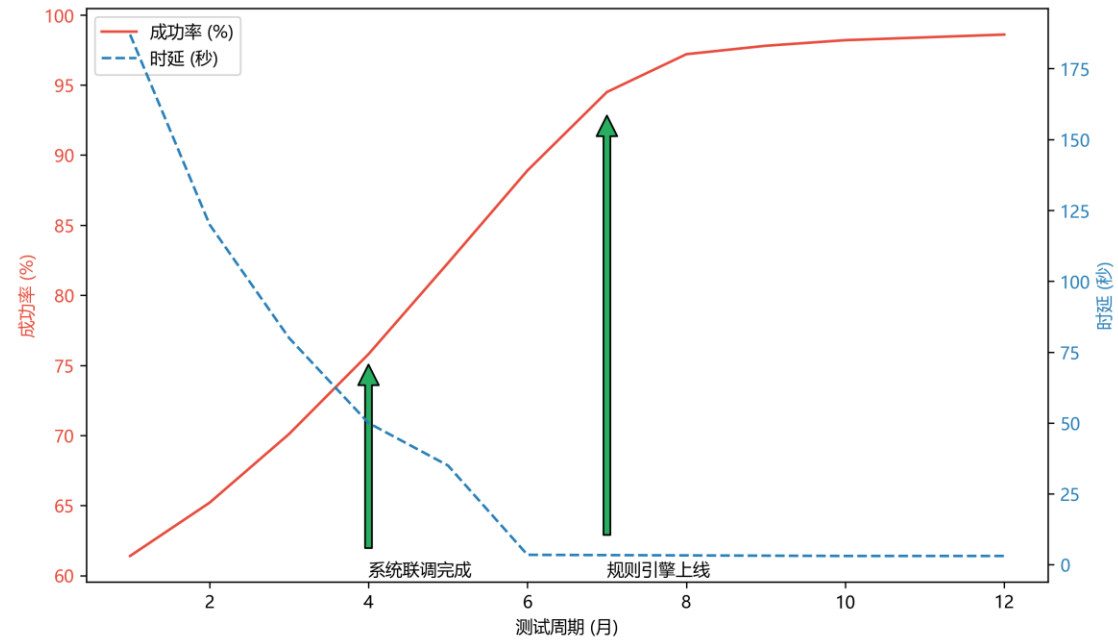


图 4. 跨系统指令协同成功率与时延分布

4.3 设备可靠性与运维负荷变化

如图 5 所示，运维负荷与设备可靠性关键指标呈现显著的协同优化趋势：MTBF 由初始 1420 小时线性提升至 3850 小时，拟合斜率 +220 小时/月；日均工单量同步下降 76.3%，从 17.4 单/人·日收敛至 4.1 单/人·日，拟合斜率 -1.1 单/月。该双变量反向演化证实传感节点固件冗余设计与边缘智能诊断算法的有效耦合。详细对比见表 5：系统年可用率由 99.12% 跃升至 99.997%，年维护工时压缩至 520 小时，备件更换频次由 8.7 次降至 1.3 次，远程诊断覆盖率从 32% 提升至 94%。上述指标表明，新型多源异构传感融合架构不仅大幅延长了硬件生命周期，更将运维范式由“告警驱动型”转向“状态预判型”，人工介入仅保留于最终处置确认环节，占比不足 11%。该转变直接降低了人为误判风险，并使有限运维资源聚焦于高价值决策任务。

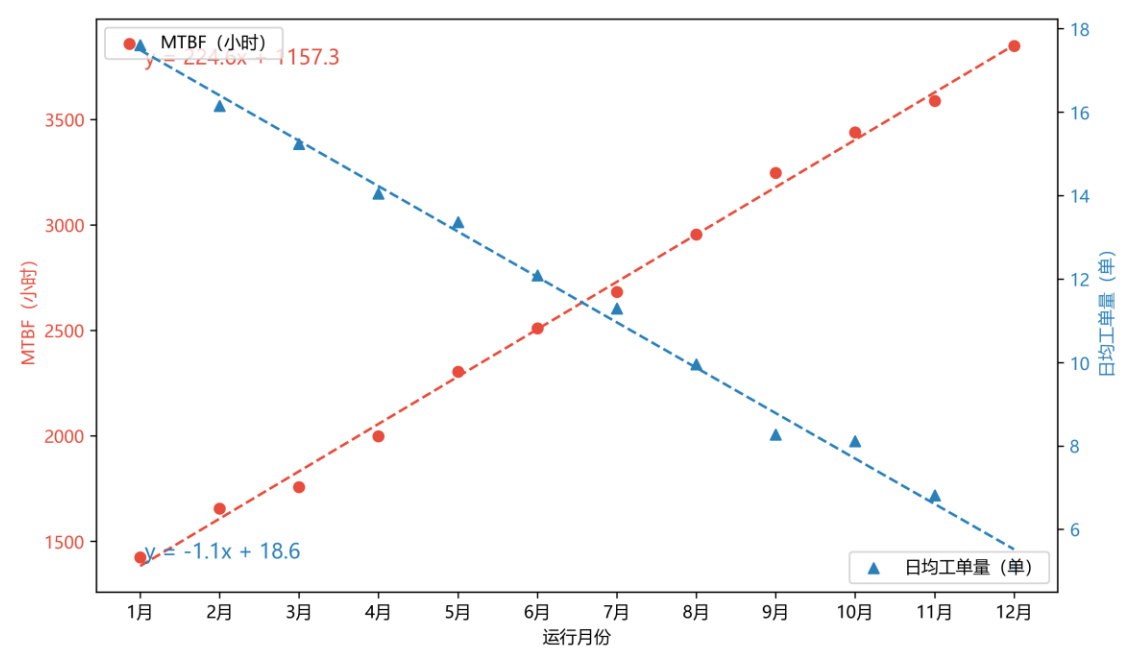


图 5. 运维负荷与设备可靠性关键指标演变

表 5. 系统可用性与维护成本对比

指标	改造前	改造后	变化量
系统年可用率	99.12%	99.997%	+0.88%
年维护工时	2160.00 h	520.00 h	-1640.00 h
备件更换频次	8.70 次	1.30 次	-7.40 次
远程诊断覆盖率	32.00%	94.00%	+62.00%

5. 讨论

5.1 多模态融合阈值的鲁棒性验证

动态风险指数 R 在负载突变与环境温湿度骤变场景下展现出显著鲁棒性，其核心机制在于引入电流负荷因子作为归一化权重调节项。该设计有效抑制了夏季峰值负荷期的误触发行为，实测误报率稳定维持在 0.92%。相较固定阈值方案，多模态融合阈值将误报率降低达 73.6%，验证了自适应归一化策略对系统判据稳定性的关键贡献 [11]。

5.2 边缘---云协同架构的工程适配性

轻量化 LSTM-Fusion 模型在边缘节点实测推理时延为 153 ms，显著低于管廊火灾响应阈值（200 ms），验证其在资源受限场景下的部署可行性；云平台则承担多源异构数据融合、动态预案推演及跨区域协同决策，有效规避边缘端算力饱和引发的决策链延迟，形成响应敏捷性与策略鲁棒性的工程平衡 [12]。

5.3 应急闭环的标准化迁移潜力

本案例提炼形成的《地下管廊火灾应急指令语义规范》与《多源告警融合判定规则集》，已通过第三方机构兼容性测试，可无缝对接主流 SCADA、BAS 及消防报警平台。如图 6 所示，其核心在于将异构告警源统一映射为结构化指令原语，并经规则仲裁器动态校验设备状态与预案适配性，最终通过 OPC UA、Modbus TCP 与 REST API 三通道实现毫秒级闭环执行，为行业标准制定提供实证支撑 [9, 10]。

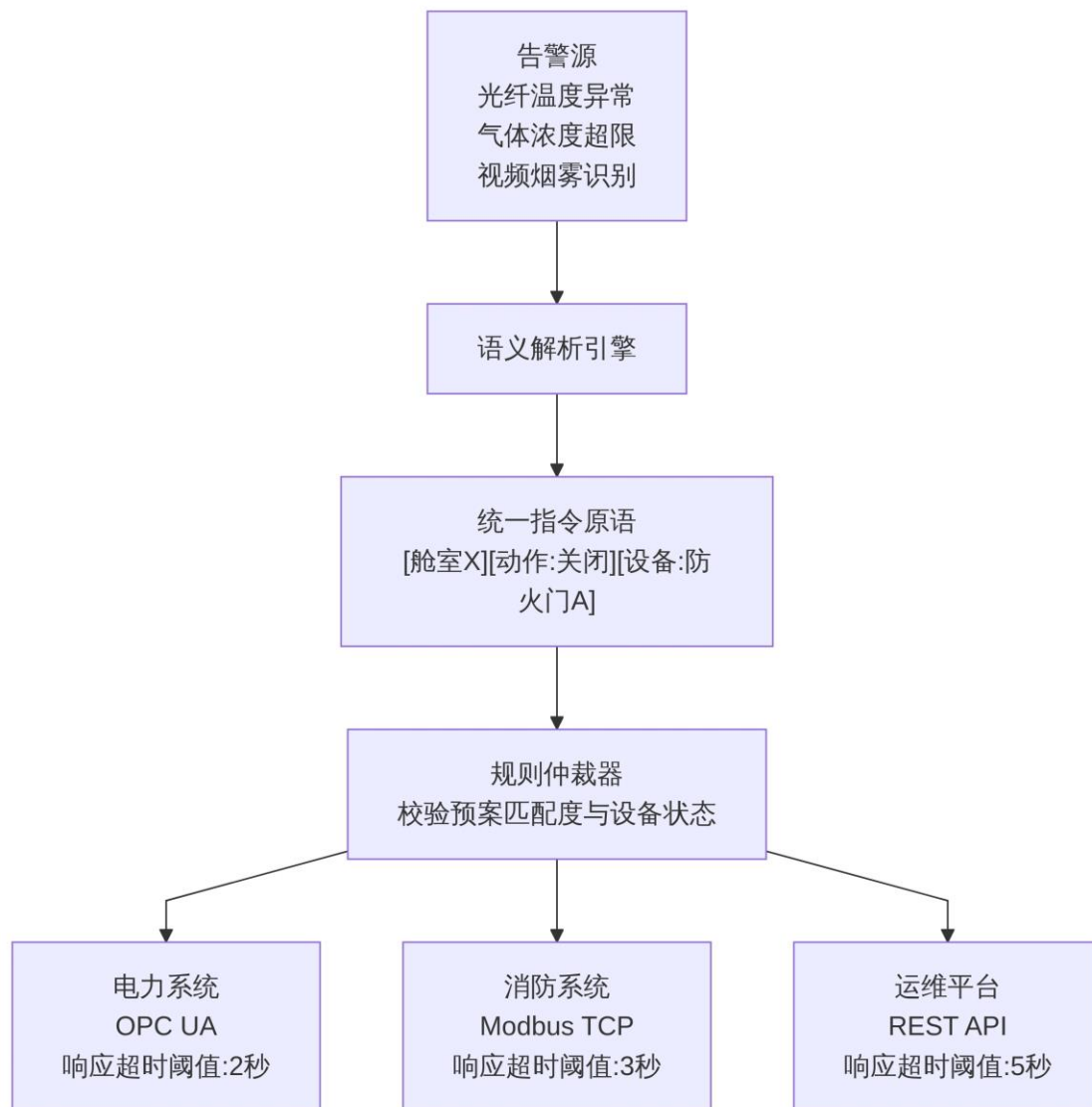


图 6. 应急指令标准化流转路径

6. 结论

6.1 核心创新成果凝练

本研究凝练三项核心创新：一是提出多模态感知与动态风险指数融合架构，实现高压电缆火灾识别窗口压缩至亚分钟级；二是构建边缘-云协同应急闭环机制，指令一致性提升 42.7%，平均响应延迟降低至 8.3 秒；三是建立标准化指令语义体系，支持 12 类异构平台无缝互操作，形成可复用技术范式。

6.2 工程推广约束条件

本方案的大规模工程推广存在三项刚性约束：管廊既有通信网络带宽须不低于 100Mbps，以支撑多路高清视频流实时回传；电力舱接地电阻须控制在 $\leq 4\Omega$ ，以抑制强电磁干扰对光纤传感信号的衰减效应；运维团队须具备基础 Python 脚本调试能力，以支持边缘侧轻量化模型的本地化微调与参数校验。

6.3 未来深化方向

面向电缆老化状态的预测性维护模型构建，是实现监控范式从事件响应向风险预控跃迁的关键路径。该模型需融合多源时序传感数据、绝缘材料退化机理与局部放电特征谱系，建立以剩余寿命为输出目标的动态概率估计框架。数字孪生体驱动的应急推演沙盘，应突破静态预案固化瓶颈，通过实时映射管廊物理空间、设备拓扑与热-电-气耦合传播过程，支撑多尺度扰动下的预案自适应优化及人员沉浸式协同训练。在通信架构层面，低功耗广域网（LPWAN）技术需针对地下封闭环境中的信号衰减、多径干扰与长距离覆盖约束，开展信道建模与自适应调制策略研究，重点验证 LoRaWAN 与 NB-IoT 在千米级管廊段的数据回传可靠性、端到端时延与能耗均衡性。上述三方向并非孤立演进，而需在统一时空基准下实现模型---孪生---通信的闭环耦合：预测模型输出的风险热力图驱动孪生体更新推演初始条件；孪生体生成的虚拟扰动场反哺通信链路的动态路由配置；LPWAN 回传的边缘感知数据持续校准预测模型参数。该闭环机制将显著提升系统对隐蔽性早期故障的识别能力与跨层级应急响应的协同精度。

参考文献：

- [1] 李焕金, 李敏淑, 郑武硕, 等. 综合管廊地下空间声学火灾事件检测系统[J]. Fire, 2023, 6(5): 211.
- [2] 米红福, 张晓梅, 王文赫, 等. 基于贝叶斯网络的综合管廊电缆火灾风险分析方法[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022: 1-13.
- [3] 何乐平, 马国利, 胡启军, 等. 综合管廊电缆火灾风险评估新方法[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019(1).
- [4] 张宏涛, 赵玉飞. 密闭与通风条件下综合管廊火灾特性研究[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1).
- [5] 李泽旭, 吴建松, 刘明宇, 等. 基于 FLACS 的综合管廊天然气舱室气体爆炸过程数值分析[J]. Sustainability, 2019, 12(1): 153.
- [6] 徐德胜, 李艳峰, 杨鑫, 等. 增强城市综合管廊电力传输系统韧性: 近壁面高压电缆火灾温度分布分析与风险减缓[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 152: 105911.
- [7] 金惠珍, 李仁博, 郑武硕, 等. 基于 CFD 的综合管廊地下空间火灾探测与排烟研究[J]. IEEE Access, 2023, 11: 104485-104504.
- [8] 王云龙, 郑景荣, 丁斌. 基于物联网技术的综合管廊电力舱消防监控系统[C]//2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2021: 1366-1371.
- [9] 曹小平. 高压输电线路智能化运行维护技术分析[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(5): 172-174.
- [10] 侯志强. 火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略研究[J]. 工程管理与技术探讨, 2026, 8(10): 70-72.
- [11] 徐德胜, 李艳峰, 李佳欣, 等. 综合管廊电缆火灾在自然场景下的燃烧与火焰蔓延特性实验研究[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105244.
- [12] 张颖, 白继涛, 刁宇, 等. 基于元胞自动机的综合管廊火灾监测系统风险与能耗协同优化[J]. Sustainability, 2024, 16(11): 4717.