

基于人工智能的变电站消防设施远传系统管理研究

郭卫江

天津泰达电力有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8375

[摘要] 变电站消防的关键挑战不在于“数据是否可用”，而在于“能否将多源数据整合成可靠的判断并驱动响应”。针对电缆层、GIS 机房、电池室等高风险场景，本文在现有告警/远程监控标准框架下，提出“感知-边缘-平台-联动”的整体解决方案：站端将烟雾、温度、可燃/有毒气体、线温、关键电气参数以及可见光/热成像观测数据整合成可比拟的事件证据，并利用轻量级识别器和改进的 D-S 融合提供可解释的置信结论；平台将结论投射成规整化的处置序列（如关闭风阀、分区灭火、通过断电实现免疫区域隔离等），并通过指标看板持续校准误报、延时和闭环质量。研究和探讨表明，引入 5G/电力物联网和云边协同，可以显著减少确认链中的人工干预和往返时延，使运维从被动响应转向预防控制。

Research on Remote Transmission System Management of Substation Fire Protection Facilities Based on Artificial Intelligence

Guo Weijiang

Tianjin Teda Electric Power Co., Ltd.

[Abstract] In substations, the challenge of fire protection is less about data availability than about turning heterogeneous signals into trustworthy, actionable decisions. Focusing on cable trenches, GIS halls, and battery rooms, we design an integrated Perception-Edge-Platform-Orchestration pipeline under existing alarm/remote-monitoring codes. At the edge, smoke/temperature/gas, linear heat cable, electrical features, and visible/thermal streams are aligned into event-centric evidence; compact vision and anomaly models, fused via an improved Dempster-Shafer scheme, yield interpretable confidence for early warning. The platform then maps decisions to rule-compliant playbooks (e.g., damper shut-off, zoned agent discharge, selective de-energization) and tracks precision, latency, and closure quality. Case-in-discussion indicates that 5G/Power-IoT and cloud-edge collaboration shorten round-trip delays and reduce manual confirmation, enabling a shift from reactive response to proactive prevention.

一、引言

运行单位在推进“无人/少人值守”后，消防从“就地经验判断”转为“远程证据判定”。现有远传系统已能把报警主机、泵柜与若干传感器接入平台，但在多源异构、误警甄别与联动决策上仍留有空白：同一事件往往被拆分为数十条点告警，值守人员需要在嘈杂信息里拼出因果链；视频与热像在逆光、蒸汽与焊花干扰下容易“报而不准”；联动多依靠静态规则，面对复杂工况缺少“最小风险”的动作排序。围绕这些痛点，我们把“事件”而非“点位”作为最小分析单元，通过边缘侧的时间对齐与特征萃取，将可见光/热像与烟温气、电气参数等合成可比较的证据集，再以改进的 D-S 融合与阈值自校准输出规范化的结论；平台侧只在满足规范前提下，给出可解释且可追溯的处置序列，并以真实运行数据持续收敛误警与

时延^[1]。

尽管如此，面向变电站的传统远传系统仍面临三方面挑战：其一，多源异构数据难以融合形成“可信证据链”，导致误警与漏警并存；其二，视频/图像算法对复杂站区背景（强光干扰、热源伪影、户外烟尘等）适应性不足；其三，联动策略多依赖固定规则，难以兼顾响应速度与处置准确性。近年来，面向超高压变电站的智慧消防系统研究显示，通过通信与智能算法与传统设备协同，可将初级火情处置时间压至“10 s 级”、显著提升判断准确度；同时，基于改进 D-S 证据理论的多传感融合方法，能够有效缓解单一传感器易误判的缺陷，提升预警准确率。这些成果为 AI 赋能变电站消防远传系统提供坚实技术抓手。

同时，国家与地方层面的标准化也在向“远程监控+物联

网监测+平台化治理”演进：除既有的报警与远程监控规范外，部分地区发布了《消防设施物联网监控系统技术标准》《智慧消防信息平台通用技术要求》等技术文件，推动“设备—平台—监管”的数据要素规范化与互联互通，为 AI 算法在线部署与闭环联动提供合规支撑^[2]。

基于上述背景，本文拟围绕以下问题展开：如何在满足现行标准体系的前提下，系统化集成深度学习检测、改进 D-S 融合与联动决策优化，形成可工程落地的变电站消防设施远传系统；如何通过云边协同与 AIops 化运维，持续降低误警率与响应时延，并在企业级平台中实现可解释、可追溯与可评估的闭环治理。本文的贡献在于：（1）提出面向变电站的 AI 赋能远传系统总体架构与数据流设计；（2）给出多源信息融合与烟火/异常识别在站区的模型选型与部署要点；（3）从标准对齐与工程实施角度总结可迁移的实践路径与评价指标体系。

二、系统架构

在站端，边缘网关接入报警主机与若干工业协议，统一时间基准后，把“可观测的变化”做成简洁特征（例如烟雾羽流的时空纹理、热像梯度、端头温升与局放活跃度的短窗统计），只上送用于判定的“证据摘要”，把带宽留给真正需要的视频片段。边缘侧同时封装规则底座（例如喷放延时倒计时、防误触条件与免疫区隔离），把“先决动作”留在站内，避免所有决策都经过平台来回确认。平台层接过的是事件而非点位：融合引擎对证据冲突给出置信度与解释语句，处置引擎把结论映射到剧本（关风阀→二次确认→分区喷放/断电）并记录每一步的触发原因、时间戳与人工干预。这样形成的“证据链—动作链—审计链”是运维闭环与合规稽核的共同基础。

在站端部署工业边缘网关/工控机，承载轻量化目标检测与异常检测模型（如蒸馏后的小型 YOLO、时序异常检测器），并完成协议适配（消防主机、Modbus/TCP、IEC 104/61850 网闸侧数据镜像等）。边缘侧负责：①多源时间对齐（PTP/NTP）、②特征抽取与压缩上送、③本地先决联动（如延时喷放倒计时联动逻辑）与④失联时的降级保护（Fail-safe）。通过“区内 OT/安防网—安全隔离—IT/云平台”的分区分域，兼顾时效与安全合规^[4, 41]。

平台聚合来自边缘的“证据流”，以标准化数据域管理（设备台账、点位字典、告警字典、联动策略库）为底座，提供：①多证据融合（见下节 D-S/概率推断）、②事件画像与处置剧本（Playbook）、③评估看板（误警率、平均确认时延、处置闭环率等 KPI），并对接政务/消防部门的智慧消防平台或地标接口（如 DB35/T 2054—2022、地方物联网监控标准）以保证互联互通。

联动策略遵从 GB 50116—2013 的消防联动原则，结合站内风机/门禁/喷放/断电区域化控制，形成“规则底座+AI 评估”的双轨机制：规则确保可解释与合规，AI 负责在不确定场景下给出推荐动作序列（如“先关风阀→延时 15 s 确认→

触发局部喷放”），平台记录过程供稽核追溯。

三、AI 应用场景

本节将介绍一些试点经验与 5G+AIoT+大数据前景关联的报告。

早期识别强调“能察觉，能理解”。在烟雾浓度尚低时，使用轻量级探测器结合热像变化检测，优先输出“疑似事件+证据片段”，而非堆叠大量帧级框。多源融合并非“少数服从多数”：当热像与烟雾探测器相互矛盾，或发生单源故障（如维护断电）时，融合引擎会根据来源的可靠性和历史一致性重新分配置信度，生成“继续观察/请求复核/触发联动”的分级建议。紧急联动遵循标准流程，并非让模型直接决策，而是提供排序后的动作序列和成本估算（例如 15 秒后关闭风阀，热像衰减未达到阈值，则升级为区域喷洒），并附带可解读的文本和可回放的证据片段。就全网而言，依托 5G 专网和边缘计算，将推理前移，并将摘要上传至云端；跨站点对比学习提升不同光照/绕线条件下的鲁棒性；并通过统一的口径指标仪表盘验证改进是否真正有效^[4-6]。

从“点告警”到“事件级置信”。对烟、温、气、视频、热像与电气参数（负荷、接触温升、局放等）构建“证据池”，采用改进 D-S 证据理论或概率图模型进行置信分配与冲突管理，输出事件级“起火可能性/误警概率”。研究与专利表明，D-S 能在传感冲突、干扰或缺失时保持较稳健的判断，适合站区“弱可观测+强干扰”环境^[3]。

面向“未燃先防”的风险建模。基于电缆沟/端头温度、湿度、浸水、水位、局放与历史缺陷记录的时间序列建模，结合异常检测（Prophet/Isolation Forest/时序自编码器）构建“热失控/碳化/绝缘劣化”风险指数；对连续升温但未触发门限的“亚健康”状态触发工单与复核巡检，提前治理隐患。

剧本化联动与数字孪生推演。通过数字孪生把“空间—设备—人员—风道/气体”耦合成可计算场景，依据火源位置与风向、站内分区与喷放覆盖，自动评估“关阀/排烟/断电/喷放”序列的效果与代价，给出最小化风险的动作建议并记录可解释路径（证据链+规则命中+仿真结果）。

多地电网公司在无人值守站与智慧消防方面开展试点^[7]：如高喷消防机器人在 500 kV 站执行远程灭火演练与值守，减少人员暴露并提升处置效率；各地推广巡检机器人与视频 AI 用于异常识别，浙江等地的无人值守与机器人渗透率较早期已显著提升。这些工程实践验证了站区消防的可行性，为后续 AI 联动与标准化提供落地样本^[6]。

在网络和计算架构方面，利用 5G 专网/切片+MEC，将视频/热像推理下沉至边缘，仅将事件摘要（矢量特征和证据分数）汇聚至云端；并基于本地《智慧消防信息平台通用技术要求》和《消防物联网监控系统技术标准》进行接口对接，打通“设备—平台—监管”数据通路。北京等地已发布物联网感知监控系统通信协议，推动“三水一警”及报警数据的统一接入，为跨

域联动和监管闭环奠定基础。整体路线以“5G+AIoT+云边协同+标准接口”为主，具备复制扩展的条件。

绩效评估与合规落地。围绕标准与工程实际，建议以“误警率、漏警率、平均发现时延（FDT）、平均确认时延（FAT）、到达联动时延（LAT）、处置闭环率、联动正确率、模型可解释性评分”等指标构建评估体系；并在平台侧提供“数据质量评分、模型版本与灰度记录、策略审计轨迹”以满足内审与外部监督要求。

四、优势分析

安全本质提升：从被动响应到主动预。AI 将视频/热像、烟温气、电气参数（如端头温升、局放）统一到“事件级置信”判定，能在尚未触发传统门限前给出预警，缩短“发现—确认—处置”链路；同时对误报场景（强光、蒸汽、焊接火花等）进行特征抑制，降低干扰触发造成的人为停机与应急资源浪费。

评估从“发现—确认—联动—闭环”四段展开。我们以事件为主键串起原始片段、融合置信、规则命中与联动日志，先看“准”——精确率、召回率与 F1 反映识别质量，误警与漏警用实际事件计量，融合相对单源的改进以“融合增益”给出量化证明；再看“快”——FDT（起火至首次告警）、FAT（首次告警至确认）与 LAT（确认至首动执行）分别暴露出模型、人员与设备的瓶颈，时延瀑布图帮助把优化精力落在对的环节；随后看“稳”——系统可用度、两次误警间隔与修复时长，加上链路丢包/抖动与模型漂移预警，保证算法升级不吞噬生产 SLA；最后看“合规与成效”——规则一致率与审计通过率对外可交代，处置闭环率、联动正确率与误停机/人员暴露时长下降对内证明价值。目标设定遵循“试点看改进、规模看门槛”：试点阶段追求 F1 提升、LAT 下降的相对幅度，规模阶段转为硬阈值（如 $FAR \leq \frac{1}{1000}$ 、可用度 $\geq 99.5\%$ 、 $FDT \leq 10s$ 、 $LAT \leq 30s$ ），并按站型与风险等级分层管理。运维模式从“定期巡检”转向“AIoPs 化维护”。引入时间序列异常检测与健康指数（温升趋势、潮湿/浸水、局放活跃度等），对“亚健康”状态进行工单化管理；与 DB/地标接口对齐后，站→平台→监管形成闭环，沉淀为面向企业的知识库，持续降低维护成本与人工暴露风险。

5G 专网/切片与 MEC 支撑边缘就地推理、云侧模型编排与全网对比学习；标准化的点位字典与“用户信息传输装置”接口（GB 26875.1）便于跨地区复用与监管对接。各地智慧消防平台/协议的发布，为规模化复制提供了条件。

五、绩效评估指标体系

在时效性上，将链路拆解为“发现—确认—联动”三段：FDT（起火至首次告警）、FAT（首次告警至确认）与 LAT（确认至首个联动动作执行）。边缘侧同时记录模型推理与本地联动的时戳，平台侧还原“时延瀑布图”，以定位瓶颈究竟来自模型、网络、规则，还是执行装置，从而指导规则优化与算力配置。

再次，在稳定性上，以可用度、两次误警间隔（MTBFA）、平均修复时间（MTTR）以及链路上送成功率、抖动与丢包率刻画系统与网络的韧性；对模型建立“健康监测”，包含分布漂移预警、灰度发布与回滚时长，确保算法演进不侵蚀生产 SLA。所有事件统一以 ID 串联“原始片段—融合置信—规则命中—联动日志—工单闭环”，形成可追溯证据链。

最后，在合规与业务成效上，以“规则一致率”“审计通过率”体现对规范的遵循；以“处置闭环率”“联动正确率”“误停机与人员暴露时长下降率”衡量实际收益。目标设定遵循“试点看改进、规模看门槛”的路径：前期强调相对改进（如 F1 提升、LAT 下降），成熟期设定硬指标（如 $FAR \leq 1\%$ 、 $A \geq 99.5\%$ 、 $FDT \leq 10s$ 、 $LAT \leq 30s$ ），并按站型与风险等级分级达标。评估以周为单位观察趋势、以月为单位完成闭环复盘，纳入 PDCA 持续改进与知识库沉淀。

六、结论与展望

将散点告警重构为可验证的事件证据，规则与模型串联运行，这是从“看见”到“最优处置”的关键路径。与其一次性构建“大而全”的平台，不如以站点为单位迭代推进：边缘侧先固化 1-2 个可复制的场景，平台侧稳步统一输出指标，再逐步融合 5G 专网、云边协同和数字孪生。证据、行动、审计构成的闭环，不仅可以减少误报和时延，更可以将每一次处置转化为可学习的资产，支撑长期主动预防和持续优化。

【参考文献】

- [1]北京市消防救援总队. 北京消防物联感知监控系统通信协议（通知）[S/OL].（2025）. <https://www.fire114.cn/index/article/detail?i=137742>.
- [2]应急管理部. 对十三届全国人大四次会议第 8387 号建议的答复：推进智慧消防示范建设与标准体系完善[S/OL].（2022）. https://www.mem.gov.cn/gk/jytabljggk/rddb/jydfzy/2921rddb/202201/t20220111_406963.shtml.
- [3]李宏伟, 张宋彬, 李婧, 等. 基于改进 D-S 证据理论的变电站火灾监测报警技术研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(05): 45-48.
- [4]殷波. 基于改进 YOLOv8 的轻量化火灾检测算法[J/OL]. 计算机科学与应用, 2024, 14(9): 47-55. DOI: 10.12677/csa.2024.149186.
- [5]孙剑. 基于改进 YOLOv5s 的火焰烟雾检测方法[J]. 信阳师范学院学报（自然科学版）, 2025(2): —.
- [6]张琦. 智慧消防在高层建筑消防安全管理中的应用研究[J]. 智能城市应用, 2025, 8(6): 79-86.
- [7]中国江苏网. 泰州市电网首台智能高喷消防机器人上岗[EB/OL].（2023）[2025-09-21]. https://jsnews.jschina.com.cn/tz/a/202312/t20231214_3333153.shtml.