

## 智能监测与预警系统在变电站密闭空间生命安全保障中的应用研究

张延辉, 张宋彬, 石云松, 李俊华, 郑含璐, 许冬, 宋淳, 李玉倩, 李东杰

国网河南省电力公司郑州供电公司 河南郑州

**【摘要】**本文主要聚焦智能监测与预警系统在变电站密闭空间生命安全保障中的应用。文章先介绍了系统的架构组成, 涵盖各部分组件, 以及所运用的关键技术。然后, 详细阐述了该系统在变电站密闭空间生命安全保障中的具应用与功能实现, 包括环境安全监测、人员安全保障和应急联动机制。在文章的结尾, 探讨了未来发展趋势, 谈及数字孪生与全场景模拟深度融合、轻量化 AI 模型与边缘智能计算普及、跨系统协同与联邦学习机制扩展等, 为变电站密闭空间的安全保障提供了新的思路 and 方向。

**【关键词】**智能监测与预警系统; 变电站密闭空间; 生命安全保障; 具体应用

**【收稿日期】**2024 年 12 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 1 月 10 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250005

### Application of intelligent monitoring and early warning systems in ensuring life safety in enclosed spaces of substations

Yanhui Zhang, Songbin Zhang, Yunsong Shi, Junhua Li, Hanlu Zhen, Dong Xu, Chun Song, Yuqian Li, Dongjie Li  
State Grid Henan Zhengzhou Power Supply Service Co., Ltd., Zhengzhou, Henan

**【Abstract】**This paper primarily focuses on the application of intelligent monitoring and early warning systems in ensuring life safety in enclosed spaces of substations. It begins by introducing the system's architectural composition, covering the various components and the key technologies employed. Subsequently, it elaborates on the specific applications and functional implementations of this system in ensuring life safety in enclosed spaces of substations, including environmental safety monitoring, personnel safety assurance, and emergency response coordination mechanisms. At the conclusion of the paper, future development trends are discussed, touching on the deep integration of digital twins and full-scenario simulations, the popularization of lightweight AI models and edge intelligent computing, and the expansion of cross-system collaboration and federated learning mechanisms. These provide new ideas and directions for ensuring safety in enclosed spaces of substations.

**【Keywords】**Intelligent monitoring and early warning system; Enclosed spaces of substations; Life safety assurance; Specific applications

#### 引言

变电站密闭空间, 比如电缆层、GIS 室等, 往往因环境封闭、设备密集等特点, 长期面临多重安全隐患。传统安全管理依赖人工巡检与基础监测设备, 存在实时性差、漏检率高、缺乏主动预警机制等问题, 难以及时发现动态风险。基于此, 智能监测与预警系统通过物联网与 AI 技术实现全天候环境感知与数据驱动决策, 可将事故识别响应时间从小时级压缩至秒级, 这为破解密闭空间安全困局提供了革

新性解决方案。

#### 1 智能监测与预警系统的架构组成及核心技术

##### 1.1 系统组成

智能监测与预警系统是建立在物联网、大数据和人工智能技术基础上, 利用传感器实时采集环境或设备数据, 结合算法分析异常模式并主动预警的一种综合性安全防护系统。它存在的目的在于预防事故并保障人员与设施安全。智能监测与预警系统由感知层、传输层、处理层和应用层四部分构成, 靠

各层级的协同作业实现全链条闭环管理。其中，感知层主要通过部署多参数传感器网络，如温湿度、气体浓度、人员定位等，构成全域覆盖的数据采集体系，能实时捕获环境参数、设备状态及人员行为数据，其核心在于高精度传感器的冗余设计与抗干扰能力优化；传输层依托物联网技术(NB-IoT/LoRa)与5G通信协议，构建低时延、高带宽的数据传输通道，其中NB-IoT适用于低频窄带场景的稳定回传，而5G技术则支撑高清视频流与高并发数据的实时交互，两者互补形成分层传输架构；处理层采用“边缘-云端”协同计算模式，边缘节点通过轻量化算法实现数据清洗、特征提取及本地预警。云端平台则集成大数据分析引擎与机器学习模型，完成多源数据融合、异常模式识别及动态风险评估。比如，其可基于深度学习的气体泄漏趋势预测和人员行为异常检测；应用层以可视化监控界面为交互核心，结合声光报警、APP或短信推送等多端预警机制，实现分级响应，同时支持历史数据回溯与应急预案模拟，形成“监测-预警-处置-复盘”的闭环管理<sup>[1]</sup>。这一架构通过分层解耦与模块化设计，既保障了系统的实时性与可靠性，又为后续功能扩展预留了接口。

## 1.2 关键技术

智能监测与预警系统最核心的技术还是人工智能与数据科学，最终是通过多维度技术融合来实现的从数据感知到风险决策的“闭环”。其中，AI算法的主要功能是基于机器学习与深度学习的异常模式识别技术（比如通过时序分析模型对气体泄漏浓度变化趋势进行预测，或利用卷积神经网络对人员定位轨迹进行行为异常检测），识别违规停留、误入高危区域等风险；多源数据融合，整合的是环境参数（如：温湿度、气体浓度）、设备状态（如：电流、电压波动）及人员定位等多模态数据。主要通过卡尔曼滤波与知识图谱技术消除数据冲突，构建统一时空基准下的关联分析框架。如：将SF<sub>6</sub>泄漏事件与设备绝缘故障、人员操作记录进行因果推理；动态风险评估模型主要采用贝叶斯网络与强化学习算法，结合历史事故数据库和实时监测数据，建立动态威胁等级划分机制。例如，在高温高湿环境下，根据设备老化系数与人员作业时长自动调整风险阈值，实现从“低风险提醒”到“紧急避险指令”的分级响应<sup>[2]</sup>。这些技术通过边缘-云端协同计算架构实现低时

延处理，同时引入联邦学习保障数据隐私，最终形成兼具预测性、自适应性和可解释性的智能安全防护体系。

## 2 智能监测与预警系统在变电站密闭空间生命安全保障中的应用及功能实现

### 2.1 环境安全监测

#### 2.1.1 有毒有害气体（SF<sub>6</sub>、CO）浓度超标预警

智能监测与预警系统靠部署高精度气体传感器网络，对变电站密闭空间内的SF<sub>6</sub>、CO等各类有毒有害气体进行实时监测与预警。SF<sub>6</sub>作为绝缘气体广泛应用于GIS设备中，但它一旦泄漏就会形成缺氧环境，而CO则是设备过热或火灾产生的致命气体。系统主要采用电化学传感器与红外光谱技术，结合冗余设计提升检测可靠性。例如，在电缆层、开关柜等关键区域布设多节点传感器，可以形成空间全覆盖的监测网络。监测数据通过物联网技术实时传输至处理层，利用AI算法即可分析气体浓度变化趋势，提前30-60分钟预警潜在泄漏风险，并联动排风系统自动启动稀释有害气体<sup>[3]</sup>。还比如，当SF<sub>6</sub>浓度超过1000ppm阈值时，系统会触发声光报警并推送定位信息至运维人员终端，同时生成事故溯源报告，辅助后续检修决策。除此之外，系统还可以通过多源数据融合技术，将气体泄漏事件与设备电流波动、人员操作记录关联分析，区分自然泄漏与人为误操作场景，有效降低误报率。

#### 2.1.2 温湿度异常引发的设备故障风险预判

温湿度监测是预防变电站设备故障的核心环节。智能系统主要通过分布式温湿度传感器与边缘计算技术，实现对环境异常的精准预判与主动干预。在密闭空间中，高温易导致绝缘材料老化加速，而湿度过高则可能引发设备凝露、局部放电甚至短路。系统可采用电容式温湿度传感器与热成像摄像头协同工作，在变压器室、电容器组等热点区域实时采集数据，并通过边缘计算节点进行本地化分析，减少云端传输延迟。举个例子，当检测到柜内湿度持续超过85%RH时，系统会结合设备运行状态（如：负载率、散热风扇转速等）动态评估风险等级。如果同时存在温度梯度异常（温差>15℃），则判定为凝露高风险，自动启动除湿装置并推送三级预警；如果仅湿度超标但设备处于低负载状态，则发送一级维护提醒至巡检人员<sup>[4]</sup>。此外，系统还集成了数字孪

生技术，能够基于历史数据构建设备老化模型，预测温湿度长期影响。比如，对于油浸式变压器，通过分析 10 年温湿度波动曲线与绝缘油色谱数据，可提前 3 个月预警套管密封性能下降趋势，指导预防性检修。

## 2.2 人员安全保障

### 2.2.1 实时定位与电子围栏

智能监测与预警系统主要是通过融合超宽带定位、射频识别及视频图像识别技术，实现对变电站密闭空间内人员的精准定位与电子围栏防护。在高压危险区域，比如 GIS 室、变压器附近，系统可以通过部署定位基站与电子标签（如：佩戴于作业人员安全帽或工装），实时追踪人员位置，精度可达厘米级。当检测到人员接近电子围栏划定的高危区域，这时带电设备安全距离阈值，系统触发三级联动响应。前端声光报警器即时提示人员撤离，监控平台弹窗显示违规位置，同时通过 APP 推送告警信息至管理人员。此外，系统支持历史轨迹回溯与电子围栏动态调整，可根据设备运行状态（比如检修期间需临时扩大隔离区），自动更新防护范围，实现灵活管控。

### 2.2.2 生命体征监测

系统可通过可穿戴设备，比如智能手环、内置传感器的防护背心等，实时监测作业人员的心率、体温、血氧饱和度等生命体征参数，同时结合环境数据，可综合评估人员健康风险。例如，在电缆层等高密度作业区域，人员可能会因缺氧或高温引发晕厥，系统采用 PPG 光学传感器与红外测温模块持续采集生理数据，通过蓝牙 5.0 或 LoRaWAN 传输至边缘计算节点。数据处理层集成机器学习模型，识别异常模式。如果检测到人员心率持续超过 120 次/分钟且环境温度  $>40^{\circ}\text{C}$ ，就会判定为热应激高风险，自动降低作业区域设备负载并启动通风降温；如果检测到血氧饱和度低于 90%且伴随  $\text{SF}_6$  浓度上升，则会触发紧急撤离指令，同步通知救援人员携带氧气设备介入<sup>[5]</sup>。与此同时，系统还支持长期健康档案管理，能够基于历史数据分析个体耐受阈值，为高风险人员（如：心血管疾病患者）定制作业时长与休息周期，实现从“事故响应”到“健康预防”的升级。

## 2.3 应急联动机制

### 2.3.1 自动启动排风系统、消防设备

智能监测与预警系统通过预设风险阈值与多模态数据融合，可以实现应急设备的自动化联动控制。当系统检测到环境参数异常，比如  $\text{SF}_6$  浓度超标、温度骤升或烟雾浓度激增时，AI 算法会基于动态风险评估模型触发分级响应机制：如果气体浓度达到预设阈值的 80%，达到初级预警标准，系统会自动启动排风装置并推送预警至运维终端；当温湿度异常引发设备过热（如：电缆接头温度  $>90^{\circ}\text{C}$ ），达到中级预警阈值，系统将切断非关键负载并启动水喷淋降温；面临明火或爆炸风险，则启动紧急预警模式，系统立即释放七氟丙烷气体灭火并封锁事故区域。

### 2.3.2 与外部救援系统的数据对接

系统通过 HTTPS 标准化接口协议与 119 消防、120 急救等外部救援平台深度集成，构成“监测-报警-救援”一体化链路。在触发紧急预警（如：有人员中毒昏迷或火势失控）时，系统自动将事故位置、环境参数（CO 浓度、氧气含量）、人员定位及生命体征数据打包推送至救援平台。例如，GIS 室  $\text{SF}_6$  泄漏，系统不仅发送泄漏浓度与扩散模型，还附带受困人员实时心率与血氧数据，为救援人员制定氧气补给方案提供依据；救援过程中，系统通过 5G 网络持续回传密闭空间内的温湿度、有害气体浓度变化趋势，帮助消防员动态调整破拆路径与防护等级。事故处置完成后，系统自动生成包含环境数据、设备操作记录与救援响应的全链路报告，用于优化应急预案<sup>[6]</sup>。

## 3 智能监测与预警系统在变电站密闭空间生命安全保障中应用的未来发展趋势

### 3.1 数字孪生与全场景模拟实现深度融合

未来系统将通过数字孪生技术构建变电站密闭空间的虚拟镜像，实现物理环境与数字模型的实时交互。例如，基于高精度三维建模与物联网数据流，可模拟  $\text{SF}_6$  气体泄漏扩散路径、设备过热形变趋势等复杂场景，辅助预判事故影响范围。通过叠加历史运维数据与实时传感器反馈，系统能动态优化风险评估模型，进一步提升预测性维护准确率<sup>[7]</sup>。此外，数字孪生支持应急预案的虚拟调试，可模拟不同排风策略对有害气体浓度的抑制效果，帮助制定最优处置方案。该技术将推动变电站安全管理从“被动响应”向“主动预防+仿真推演”升级。

### 3.2 轻量化 AI 模型与边缘智能计算逐步普及

为应对变电站边缘设备算力限制,未来系统将采用模型剪枝、知识蒸馏等技术开发轻量化 AI 算法。比如,将原有的 ResNet50 模型压缩为 MobileNet 架构,在保持气体泄漏检测 95%准确率的同时,降低推理耗时,满足边缘节点的实时性要求。同时,联邦学习框架将被引入,允许多个变电站共享模型训练成果而不泄露本地数据,解决样本不足与隐私矛盾。边缘智能的普及将显著减少云端依赖,增强系统在断网等极端工况下的鲁棒性。

### 3.3 跨系统协同与联邦学习机制进一步扩展

未来系统将打破数据孤岛,通过标准化接口与电网 SCADA、消防物联网、医疗急救平台深度联动。例如,当监测到人员昏迷时,系统可同步触发变电站门禁解锁、推送患者生命体征至 120 急救中心,并自动生成最优救援路径导航。联邦学习机制将支持跨机构数据协同分析,如联合多家电力公司历史事故数据训练全局风险模型,提升使小样本场景预测覆盖率<sup>[8]</sup>。此外,区块链技术可能被用于构建可信数据共享链,确保跨系统交互时的审计溯源与权限管控。

## 4 结语

智能监测与预警系统在变电站密闭空间生命安全保障中已展现出显著的优势和价值。其可通过对环境安全的实时监测、人员安全的精准保障以及高效的应急联动机制,显著提升变电站密闭空间的安全性和可靠性。随着科技的不断进步,数字孪生与全场景模拟的深度融合将使系统能更真实地反映实际情况,提前预判潜在风险;轻量化 AI 模型与边缘智能计算的普及将提高系统的响应速度和处理能力;跨系统协同与联邦学习机制的扩展将实现不同系统间的数据共享与协同工作。未来,仍应持续深化该

系统的研究与应用,不断探索创新,进一步提升变电站密闭空间生命安全保障水平。

## 参考文献

- [1] 张陶,于立涛,王黎,等. 智能变电站双视实时在线监测智能预警系统设计研究 [J]. 微型电脑应用, 2019, 35 (12): 67-69+81.
- [2] 朱宁,丁晖,彭涛. 智能变电站电气设备运行安全的温度预警模块设计及测试 [J]. 自动化应用, 2018, (07): 53-54.
- [3] 李进,王位杰,刘文彪,等. 智能变电站安措辅助预警系统的实现 [J]. 电气技术, 2017, (04): 120-125.
- [4] 井柯,董黎芳,孙一桢. 智能变电站监测预警系统研究与应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13 (11): 153-157.
- [5] 宋丽,蔡群峰. 变电站设备状态监测与故障诊断系统优化 [J]. 光源与照明, 2024, (11): 114-116.
- [6] 孙意朝. 基于智能监测的变电站设备运行状态检修方法 [J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 373-375+378.
- [7] 李晶,吕占彪,许静静,等. 智能变电站综合自动化系统中的状态监测与诊断技术分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (09): 184-185.
- [8] 邓祖帆. 基于物联网技术的智能变电站在线监测系统设计 [J]. 无线互联科技, 2022, 19 (09): 77-79.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**