

变电站现场设备突发火灾事故应急响应仿真模型

徐广鹦¹, 臧嘉健¹, 谢秋明¹, 杨清清², 李尽致¹, 肖烨辉¹

(1. 国网上海超高压公司, 上海 200063;

2. 上海柒志科技有限公司, 上海 200135)

摘要: 为了及时感知变电站设备异常, 降低火灾误报率, 提升应急资源利用率, 提出一种变电站现场设备突发火灾事故应急响应仿真模型。根据火灾发生机理, 获取火灾预警阶段、火灾扩散阶段和火灾应急响应阶段变电站现场设备突发火灾特征; 在火灾预警阶段, 采用信息扩散理论计算火灾风险警度, 获取火灾风险智能感知预警信息; 根据变电站突发火灾事故应急响应步骤, 构建基于反向传播(backpropagation, BP)神经网络和模糊推理技术的火灾探测模型, 引入BP神经网络算法融合特征层数据, 结合模糊推理技术处理不确定性数据, 通过输出层输出合理的决策, 降低数据误差, 实现突发火灾的响应效果。实验结果表明, 所提方法的火灾事故误报率较低, 响应时间较短, 且应急资源利用率较高, 有利于保障变电站安全。

关键词: 信息扩散理论; 变电站; 感知预警; BP神经网络; 模糊推理技术

中图分类号: TP183; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)06-0104-05

Simulation Model of Emergency Response to Sudden Fire Accident of Field Equipment in Substation

XU Guang-ying¹, ZANG Jia-jian¹, XIE Qiu-ming¹, YANG Qing-qing², LI Jin-zhi¹, XIAO Ye-hui¹

(1. State Grid Shanghai Extra High Voltage Company, Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Qizhi Technology Co., Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: In order to timely perceive the abnormalities of substation equipment, reduce the false alarm rate of fire, and improve the utilization rate of emergency resources, a simulation model for emergency response to sudden fire accidents of substation on-site equipment based on multi-stage characteristics is proposed. It acquires the characteristics of sudden fire in substation field equipment during the fire warning stage, fire diffusion stage, and fire emergency response stage based on the fire occurrence mechanism. In the fire early warning stage, information diffusion theory is used to calculate the fire risk warning degree and obtain intelligent fire risk perception early warning information. According to the emergency response steps for substation fire accidents, a fire detection model based on BP neural network and fuzzy inference technology is constructed. BP neural network algorithm is introduced to fuse feature layer data, and fuzzy inference technology is used to process uncertain data. Reasonable decisions are output through the output layer, reducing data errors, and achieving the response effect of sudden fire. The experimental results show that the proposed method has a low false alarm rate for fire accidents, a short response time, and a high utilization rate of emergency resources, which is conducive to ensuring the safety of substations.

Keywords: information diffusion theory; substation; perceived early warning; backpropagation neural network; fuzzy inference technology

0 引言

随着我国电力工业的发展, 变电站已经成为了大型工业和民用电网中必不可少的组成部分^[1]。然而, 由于变电站场地狭小、设备复杂以及运行环境恶劣等特点, 变电站现场设备突发火灾时常发生, 因此, 对变电站现场设备突发火灾应急响应进行深入研究, 开展相关的防范和控制措施, 是电力工业安全稳定运行的迫切需要, 同时也是保障人民安全和促进经济发展的重要举措^[2-3]。

在上述背景下, 文献[4]提出了一种火灾应急响应建模方法, 为了探究火灾应急响应行动的时间规律, 使用着色Petri网(colored petri net, CPN)工具创建了一个Petri网模型, 该模型可有效地揭示应急响应的时间特征, 帮助相关人员更好地应对突发火灾事件。实验结果表明, 该方法能够对火灾进行及时预警, 但是存在误报率较高的问题。文献[5]介绍了基于远距离无线电(long range radio, LoRa)集成北斗通信技术的火灾应急响应方法, 该方案利用小型感知节点和汇聚终端, 实现应急环境数据的收集和汇聚。在LoRa技术的支持下, 实现感知数据与后台服务端的远程通信, 完成火灾应急响应方法设计。

*基金项目: 国网省级项目(B30950220002)

收稿日期: 2023-09-26

实验结果表明,该方案能够有效地为应急救援人员提供火情信息,帮助提供相关决策依据,为应对突发事件提供支持。但是其反应时间较长。文献[6]提出了一种灾场内、外域相结合的火灾应急响应建模方法,通过多智能体系统描述内、外域结合的应急行为规律,实现应急响应,然而,该方法存在应急资源利用率较低的问题。

针对现有方法在火灾应急响应中存在的误报率较高,应急反应时间较长以及应急资源利用率较低的问题,提出一种变电站现场设备突发火灾事故应急响应仿真模型研究方法。

1 变电站现场设备火灾发生机理及阶段特征

1.1 火灾发生机理

变电站现场设备火灾发生机理主要是由以下几个因素引起:

(1) 短路故障。由于设计、制造、运行、维护不当等原因,会导致设备的电气部分短接,使设备局部放电,产生强烈的电弧和高温,如果不及时处理,就可能引发火灾。

(2) 过负荷运行。由于负荷过大、系统故障等原因,设备在长时间的过负荷运行中,会产生过热现象。这种情况下,设备表面温度会升高,极易发生火灾。

(3) 设备温度过高。由于设备内部散热不良,设备内温度超过了其承受极限,就容易产生高温引发火灾。

(4) 杂物堆积。由于现场清洁不到位,设备周围堆积有易燃、易爆或易熔的杂物,一旦有电气故障,很容易触发火灾。

由此可见,变电站现场设备火灾发生机理非常复杂,不同因素相互交织,需要严格遵守电气设备的操作规程和保养维修要求,以减少火灾事故的发生^[7-8]。

1.2 火灾阶段特征

从火灾预警阶段、火灾扩散阶段和火灾应急响应阶段分析变电站现场设备突发火灾特征如下:

(1) 火灾预警阶段。在变电站火灾预警阶段,通常是通过变电站设备的监测和检查,及时发现异常情况并发出警报。

(2) 火灾扩散阶段。在变电站火灾扩散阶段,由于变电站内高压设备运转时容易产生电弧,电弧一旦引燃周围材料便会迅速蔓延,形成火势。火灾扩散阶段的特点是火势扩大迅速,烟雾和高温会越来越严重,容易引起爆炸等严重事故。

(3) 火灾应急响应阶段。由于变电站现场设备存储着大量的能量,因此在灭火过程中需要避免电气触点和爆炸的风险。在火灾得到有效控制后,还需要对变电站设备进行彻底的检查和整修,以确保变电站再次投入运

行的安全性和可靠性^[9-10]。

总的来说,对变电站现场设备突发火灾的每个发展阶段进行预警响应,控制火势扩散,以此减少火灾对变电站和周围环境造成的危害。

2 突发火灾事故应急响应

2.1 变电站火灾预警

通过分析变电站现场设备火灾发生机理可知,变电站火灾受多因素影响,具体划分为火灾预警阶段、火灾扩散阶段和火灾应急响应阶段。为了实现对火灾的及时、准确响应,在火灾未发生阶段,首先进行火灾风险预警。火灾风险预警的主要目的是识别和评估变电站发生火灾的潜在风险因素,以便采取有效的措施来预防火灾事故的发生。

采用信息扩散理论^[11]计算火灾风险警度,实现智能感知预警。将火灾风险划分为5个级别,并定义集合 $W=\{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5\}$ 为警度集合,其中的参数标识了安全或危险状态。

将预警的指标论域设置为 $R=\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$,风险指标集合为 $X_r=\{x_1^r, x_2^r, \dots, x_m^r\}$, x_i^r 为论域 R 内的单值样本。通过信息扩散理论,将单值样本输入模型中,计算火灾分布概率,并将其用于火灾风险预警。具体预警步骤如下:

通过正态分布模型输送单值样本 x_i^r 中的数据信息,具体表达式如式(1)所示:

$$f(r_i) = \frac{1}{C_\varphi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{x_i^r - r_i}{e^2}\right) dx \quad (1)$$

式中, e^2 表示信息扩散系数,其表达式为

$$e^2 = \begin{cases} \left(\max(x_i^r) - \min(x_i^r)\right) / (N-1)N < 10 \\ \left(\max(x_i^r) - \min(x_i^r)\right) / N & N \geq 10 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\max(x_i^r)$ 和 $\min(x_i^r)$ 分别表示样本的最大值和最小值; N 表示样本数量。

根据式(1)和式(2)得出火灾风险模糊子集隶属函数:

$$\phi(y_j^s) = h_j^s(r_i) / e^2 \sum_{i,j=1}^N f(r_i)^\varepsilon \quad (3)$$

式中, ε 表示火灾风险预警系数, h_j^s 表示通过归一化处理后的火灾风险预警信息分布结果^[12],依据该信息即可获取变电站现场设备异常状态,有利于及时发出火灾预警信息。

2.2 变电站火灾应急响应模型构建

火灾应急响应模型的建立和运行需要充分考虑实际情况,确保模拟结果的可靠性和适用性^[13]。上节从预警角度出发,获取变电站现场设备状态信息,为了提高火灾判断的精度和可靠性,根据变电站突发火灾事故应急响应步骤,提出基于BP神经网络和模糊推理技术的火灾探

测模型。

变电站突发火灾事故应急响应模型一般包括以下几个步骤：

(1) 紧急响应。在发现变电站突发火灾时，第一时间应该立即通知变电站控制室，并拨打110报警电话，同时通知消防部门。控制室要立即中止变电站的运行，关闭主开关，防止电力电源继续供电，该撤离的人员要及时撤离。

(2) 灭火救援。消防部门抵达现场后要立即启动灭火救援工作，根据火情变化情况做出灭火方案，执行有效的灭火措施，保护人员和设备的安全。同时，也要进行对周边环境的救助，例如对受伤群众的紧急处理，调度应急资源，协调灭火和救援工作，确保安全和秩序。

(3) 反馈信息。消防部门和控制室要保持通讯联络，及时提供现场信息和火势变化，以便于指挥中心和人员做出相应的应对措施。

(4) 方案实施。根据公司应急预案，进行情况评估，制定灭火方案并及时执行。同时，根据职责分工，协调组织应急工作人员分工合作，妥善安排应急资源。

(5) 事后处理。整理好事故现场和周边环境、清理废弃物，开展火灾事故调查，找出事故原因并提出针对性的处理方案，以保障今后工作的顺利开展，同时也要总结教训，完善公司的应急处理能力。

变电站火灾应急响应是通过对设备参数的实时监测和分析，以及与历史数据进行比对，及时发出火灾风险信号。具体地，搭建了一个模型，其结构如图1所示。该模型能够有效地处理变电站的各种参数数据，并提供准确可靠的综合判断结果，帮助运维人员及时做出决策，保障变电站的安全运行。

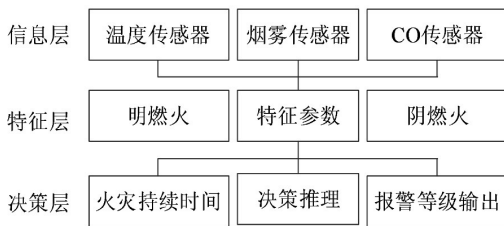


图1 变电站现场设备火灾识别模型示意图

根据图1所示，信息层主要负责收集传感器采集的3种特征参数，并将特征参数发送到特征层。特征层融合处理上述数据，通过计算获取火灾发生概率。决策层的主要作用是综合处理火灾发生概率等信息，做出火灾发生与否的决策，该模型能够为变电站的安全运行提供了有力的保障。

接下来通过BP神经网络^[14-15]比较历史火灾样本与火灾现场数据信息，推断火灾发生的概率。数据融合模型如图2所示，该模型可以提供精确的数据分析和处理，并为进一步预测和预防火灾提供有力支持。同时，该算法

的自适应性和可迁移性也使其适用于各种不同的变电站场景。

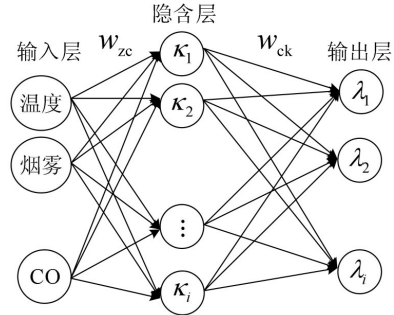


图2 基于BP神经网络的火灾数据融合模型示意图

在火灾数据融合模型中， w_{zc} 和 w_{ck} 表示连接权重； κ_i 和 λ_i 表示偏置值。这些参数可以通过训练神经网络自动调整，使得神经网络能够预测真实值，并不断逼近实际结果。

在隐含层中，采用Sigmoid函数获取非线性映射。隐含层节点数量如下所示：

$$M = \frac{\sqrt{M_i + M_j + \beta}}{\phi(y_j^s)} \quad (4)$$

式中， M 表示隐含层节点数； M_i 表示输入层节点数； M_j 表示输出层节点数； β 为常数。

由于各决策因子之间的关系非常复杂，数值大小也具有一定的模糊性。因此，在设计决策层时，需要采用模糊逻辑思想，灵活处理非精确情况。采用模糊控制规则，将输入变量和输出变量映射到隶属函数域中，实现模糊推理和决策，提高火灾预测和预防的准确性和效率。在数据融合中，不同传感器所采集到的数据往往存在误差和偏差等方面的差异，模糊推理技术可以对这些不确定性的数据进行有效处理。数据融合结果如公式(5)所示：

$$F_d = \exp \left[\frac{M \cdot |\psi(\omega_i)|^2}{\mu_i} \right] \quad (5)$$

式中， μ_i 表示由传感器采集的全部观测数据，用于表征模糊集， $\psi(\omega_i)$ 表示不同模糊集合之间的相似度，其计算公式为

$$\psi(\omega_i) = \text{sim}(\mu_i^k + \mu_j^k)^2 \quad (6)$$

式中， μ_i^k 和 μ_j^k 均表示模糊结合信息熵。

利用模糊推理技术融合传感器采集的不同火灾特征参量，可以提高火灾探测的准确性，提升应急响应效率与效果，在一定程度上减少误报和漏报的情况。

3 仿真实验分析

3.1 变电站概况

实验所面向的变电站总占地面积为9 000 m²，电压等

级为110 kV。变电站内采用的接线方式为单母线分段线,站内4台同规格变压器两两接于不同母线上,10 kV侧八段母线以“环形接线”的方式供电。站内主要安放各类电力设施(详细情况见表1),在工作不当情况下均有发生电力火灾的隐患。

表1 变电站现场设备布置情况

设备	着火点	消防配置
主变压器	套管爆炸	消防铲
电容器	电缆	MFA4
控制柜	电缆	MFA4
开关柜	内部元器件	MFA4
刀闸	电缆	MFA4

针对该变电站开展突发火灾应急响应效果测试,具体测试步骤如下:

- (1) 建立测试场景。依据变电站实际情况模拟突发火灾场景,模拟不同灾害情况,并确定测试设备等。
- (2) 实施测试。根据测试计划,对事故应急响应过程进行测试,包括响应时间、误报率以及应急资源利用率3个方面。
- (3) 评估测试结果。对测试的结果进行总结、分析,得出不同应急响应方法的可行性和有效性。

3.2 评价指标

针对上述变电站开展实验测试,通过对模拟结果进行分析,评估不同应急响应方法的效果和可行性。下面给出评估指标:

- (1) 误报率。将非高风险样本数预报为高风险样本数占总样本数的比例。误报率越低,表示预警结果的误报情况越少。
- (2) 响应时间。从发生火灾事件到应急响应措施开始执行的时间。
- (3) 应急资源利用率。指在应急响应过程中,所使用的人力、物力、财力等资源的利用率。应急资源利用率越高,则表示资源得到了充分利用,同时也能够在最短时间内及时调度应急资源。

3.3 实验结果分析

将文献[4]方法和文献[5]方法作为对比方法,三种方法的火灾误报率测试结果如图3所示。

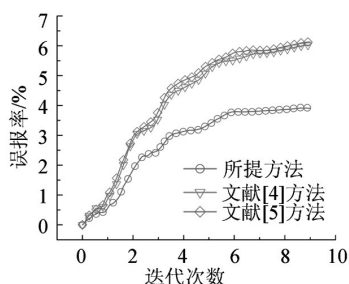


图3 误报率测试结果

由图3可知,在多次迭代中,三种方法的误报率呈现出逐渐提升的趋势,相比较之下,所提方法的火灾误报率更低,其最高值仅为3.9%,与文献[4]方法和文献[5]方法的误报率最高值相比,分别降低了1.9%和2.0%。说明所提方法能够在最大程度上实现对变电站现场设备火灾的准确预警,避免由误报带来的经济损失。

进一步通过响应时间验证所提方法的应用效果,测试结果如图4所示。

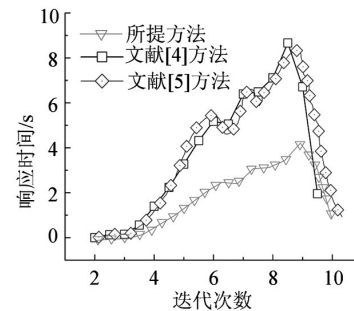


图4 响应时间测试结果

由图4可知,所提方法的响应时间最高值低于4 s,能够在更短的时间内感知变电站火灾情况,有利于在火灾蔓延之前,实现有效控制。形成如何大的差距主要原因在于所提方法通过数据融合技术对多特征参数进行综合判断,及时发出火灾风险信号,提升了火灾事故响应时间。

最后从应急资源利用率角度出发,图5为3种方法的应急资源利用率测试结果。

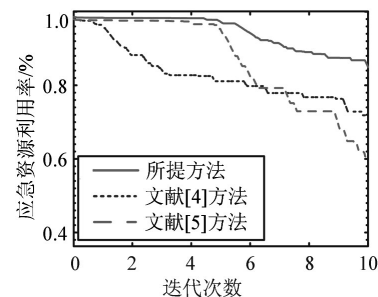


图5 应急资源利用率测试结果

在发生变电站现场设备火灾之后,充分利用当地应急资源能够有效控制由火灾带来的负面影响,因此,应急资源利用率是反映应急响应效果的关键指标。由图5可知,所提方法的应急资源利用率高于文献[4]方法和文献[5]方法,说明应用该方法设计的应急响应模型之后,应急资源能够得到有效应用,有利于提升火灾应急救援效果,降低变电站人员损伤概率,减少经济损失。

4 结束语

以降低变电站火灾误报率,提升应急资源利用率为

(下转第111页)