

[风险评估]

牵引变电所电气设施故障风险评估技术研究及应用

文/张斌

中国铁路南宁局集团有限公司

从微空间电气设施局部放电监测技术角度出发，通过丰富现场监测装置和评估手段的关键技术体系，从数据采样到诊断结果建立完整的信息处理逻辑和预警机制，确保能够及时发现局部放电事件，从而有效避免因局部放电造成设施间故障断电、电气火灾等情况发生，确保牵引变电所站内设施的稳定运行，大幅提高电气化铁路的经济收益。

牵引变电所是电气化铁路、高铁供电系统的核心设施，担任着电压转化、电能分配以及系统保护等方面的重要角色，可实现故障隔离和越区供电的功能。由于牵引变电所存在诸多关键性电气设施，如开关设备、继电保护设备等等，而这些设备长久使用过程中难免存在绝缘老化、接触不良等造成电气局部放电现象，若不及时排除，难免会造成更大的运行风险^[1]。

根据中国铁路南宁局集团有限公司（以下简称“南宁局”）近几年的所内电气故障事件发生案例，影响电气设备的安全性和稳定性主要是由于设备出现绝缘缺陷，引发局部放电，导致短路起火或跳闸故障。因早期阶段未研究有效的监测手段来排查这类问题，造成南宁局巨大的经济损失。为避免不必要的财产损失，保证牵引变电所内电气设施可靠运作，提前对牵引变电所关键设施的故障风险进行评估势在必行。本文将从局部放电监测技术角度去着手研究分析，尽可能规避电气设施易出现的突发故障，并极大减小因局部放电引发电气火灾的概率，大幅提升牵引变电所电气设施间的运行安全性，从而保障电气化铁路的持续稳定运行。

技术难题及解决方式

牵引变电所内电气设施故障风险主要体现在两

个方面：电气火灾风险和电气局部放电风险。对于前者，主要是因短路、过载、接触不良及电弧等因素造成可燃性材质达到燃点而引起的，目前多利用触发型探测器进行检测且大多都是面对空间大环境采用的综合型探测装置，如感烟探测器、感温探测器和火焰探测器等。然而这些探测器均属于事后的被动感知型，只有当被测状态量达到设定阈值时才能触发报警，而此刻电气设备可能早已故障并出现电气火灾，因此这类探测器不易及时发现并排除所内的电气火灾风险点，导致故障预防效果十分轻微。对于后者，电气局部放电预防多采用GIS局部放电、特高频和超声等检测方式，多应用在大型电气设施中。而对小型电气部件无法监测，如高压开关柜内部中的断路器、隔离开关等位置，因其线缆排布密集，易发生电气接头老化、松动和绝缘层劣化等局部放电现象，严重将引发短路跳闸、起火等大面积损坏事故，故针对微空间电气设施的故障风险评估技术还需进一步研究与突破^[2-3]。研究发现，电气设施大多数故障或起火发生前都存在一定时长的局部放电，从放电发展至故障的这一过程演化机理出发，本文提出一种基于微空间环境状况测量的极早期故障风险评估方法，涉及物理、化学特征量的综合检测及趋势评估。

由于电气设施绝缘层大多都是高分子材料,使得局部放电发展过程中除有发光、发热等物理反应外,还有绝缘层热解化学反应,故此放电发生初期一般会在受热过程中因热解现象释放带电微粒,具有粒径小(1~10 nm)、数量多等特点,其远小于烟雾颗粒粒径(400~1200 nm)。因此本文选用热解粒子探测器作为微空间环境中极早期故障风险预警技术的主要数据收集源,然后基于时序分解法实现数据的预处理及发展趋势评估,具体实现方式如下所述。

1. 硬件设计

故障风险评估装置采用在线式测量方式,主动式的对微空间内电气设施局部放电引发的关键信息状态量进行探测,其主要组件设计如下。

1) 微纳粒子探测单元。利用高灵敏度的光电探测器,基于Mie散射理论,对电气线缆绝缘层、设备接头处产生的微纳粒子进行探测,准确捕捉微弱的粒子散射光信号,并将其转化为电信号^[4]。由于易受外界环境干扰,同时配备信号放大与滤波电路,对光电探测器输出的微弱电信号进行放大处理,去除信号中的噪声干扰,提高信噪比。

2) 环境温度探测单元。包含温度传感器,用于对微空间内运行过程中的内部温度进行探测,温度测量范围应达到-40~70℃,准确度±1℃。

3) 特征气体探测单元。当绝缘缺陷发展到一定程度时,局部放电会伴随有CO、NH₃、HCL以及O₃这几种典型特征变化气体,故可利用电化学反应来计算特征气体浓度,本文选用CO传感器作为气体探测单元,浓度表现较高,易测量、灵敏度高。

4) 数据采集分析单元。对微纳粒子、环境温度和特征气体探测单元所采集的信号进行转换、分析和诊断,基于各类特征量的时序变化评估模型,对柜内局部放电程度进行评估。

5) 通信单元。具备4G、以太网和串口等通信方式,用于上传信号处理结果,并接受下传参数及控制指令。

微纳粒子传感器基于Mie散射理论,如图1所示。当一束光照射到球形粒子上时,根据Mie散射理论,散射光的强度和分布与粒子的半径、折射率以及入射光的波长等参数密切相关。本文采用主动吸气方式实现微空间下的微纳粒子采样,存储到光

敏感区,利用入射光源对粒子进行照射,粒子周围会散射出以粒子大小成一定比例的光脉冲信号,该信号可通过内置光敏器件来接收光脉冲信号并转换成相应的电脉冲信号再放大,最后通过对一个采样周期内的电脉冲进行计数,便可得到每次采样空气中的微纳粒子个数(pcs/L),进而可通过算法换算为微纳粒子浓度(μg/m³)。

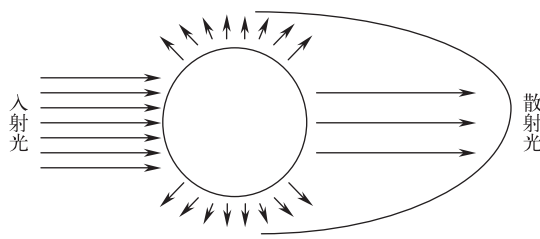


图1 Mie散射理论原理图

对于入射光源,需选用高稳定性、合适波长的激光光源,确保其能有效照射微纳粒子并产生明显散射光。根据本文研究对微纳粒子采样资料显示,可选择波长为650 nm的红光激光器,其在微纳粒子散射研究中具有良好的适用性。然后采用准直透镜、聚焦透镜等光学元件,构建稳定的光路系统,保证光源能均匀照射并穿过采样腔室内,且散射光能够高效收集。同时,设计光隔离装置,减少外界光线干扰,故应选用密封性腔体来测量,防止外界杂质进入,影响测量结果。

2. 评估方法设计

本文主要实现极早期的故障风险评估,因此主要分析微纳粒子特征量的时序变化特性,提出一种基于时序分解(STL)和注意力机制(Attention)相结合的时序预测模型,预测热解粒子浓度变化趋势,必要时发出预警^[5]。

时序分解(STL)是一种基于局部加权散点平滑技术(Loess)的时间序列分解方法。通过把热解粒子浓度时序数组分解为周期性、趋势性和残差三个主要成分,从而直观了解数据变化趋势。

首先通过构建不同超参数配置的STL时序分解单元,如设置热解粒子浓度随时间变化的采样数组的一阶差分且周期为“日”的超参数单元,采用列举矩阵的方式对采样数组序列进行线性变换,公式为

$$S_i, T_i = \text{STL}(\theta_i, xW_i), i=1, \dots, k \quad (1)$$

式中, S_i 、 T_i 分别代表热解粒子浓度的周期变动子项

和趋势发展子项； x 表示被分解的时间序列； W 表示可学习矩阵； i 表示STL时序单元编号； θ 表示STL的超参数。

其次，按照神经网络的权重分配原则，计算每个热解粒子浓度的周期变动子项的权重 β ，公式为

$$\beta_1, \dots, \beta_k = \text{SoftMax}(S_1, \dots, S_k) \quad (2)$$

最后将周期变动子项和趋势发展子项整合为一个完整的周期项 S 和趋势项 T ，公式为

$$\begin{cases} S = \text{MLP}(\sum_{i=1}^k \beta_i S_i) \\ T = \text{MLP}(\sum_{i=1}^k \beta_i T_i) \end{cases} \quad (3)$$

并通过引入多层感知机（MLP）进行学习，将温度、CO气体浓度等数据作为输入层来捕捉学习随粒子浓度的时序变化关系，从而提高热解粒子变化权重的分类，到达预测数据变化趋势的目的。

注意力机制（Attention）主要用于对每个数据阶段分配不同的注意力权重，来提高序列数据的处理能力，特别是更关注重要的时间步。

首先利用加权求和相似性函数计算当前热解粒子浓度数组Query（ Q ）和历史性热解粒子浓度数组Key（ K ）之间的相似性 S ，公式为

$$S = \text{MLP}(Q, K) \quad (4)$$

其次计算注意力权重，通过应用softmax函数来对相似性得分 S 计算权重，使所有权重的总和为1，以概率分布表示每个当前热解粒子浓度数组Query的相对重要性，公式为

$$A = \text{SoftMax}(S) \quad (5)$$

最后进行加权求和，将注意力权重和V矩阵相乘，总体计算公式为

$$\text{Output} = \text{SoftMax}\left(\frac{\text{MLP}(Q, K)}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (6)$$

式中， $\sqrt{d_k}$ 为Key数组的向量维度。

实际应用案例分析

以南宁司牵引变电所内的实际应用案例为分析基础，某月20号所内AH3开关柜内安装的故障风险评估装置发出三级预警，本文调取了该装置预警前10日的历史采样数据进行集中对比分析，如图2所示原始数据采样图。由于微纳粒子浓度与周围环境的温度都与线缆绝缘劣化热解程度相关，因此它们

存在相互关系，本文研究发现高压开关柜内的微纳粒子浓度与温度、CO气体浓度具有明显的正相关性，反之不然，因温度的变化受诸多因素影响。故此将这些因子纳入预测模型作为输入变量是非常必要的，本文基于Python编程算法内的Statsmodels库对上述三类变量进行时序分解，分解结果如图3所示。

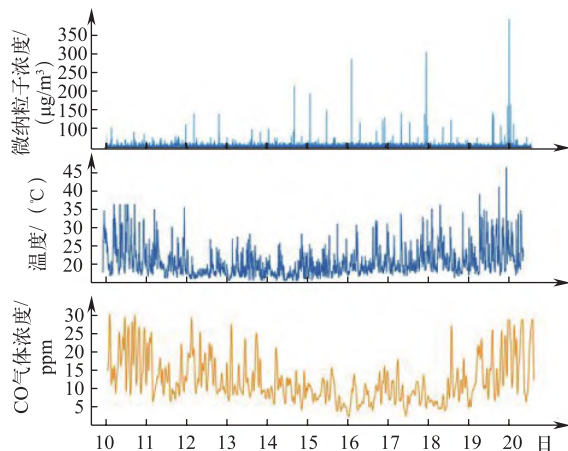


图2 原始数据采样图

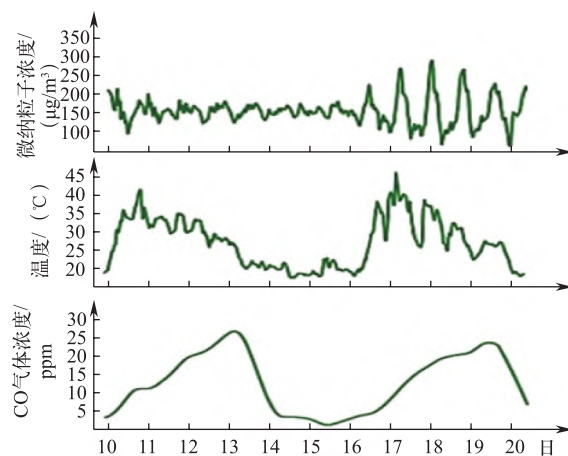


图3 时序分解结果图

从图3的分解结果中，可以直观地看出10~20日期间各变量的数值变化趋势。对于微纳粒子浓度的变化，16日之前一直处在相对平稳的状态，16日之后具有较大的波动幅度；对于温度的变化，以16日为节点，呈现升→降→升的变化趋势；对于CO气体浓度的变化，同样以16日为节点，呈现增→减→增的变化趋势。依据各变量间的相关性，由于16日之前的微纳粒子浓度变化趋势一直趋于稳定，且与温度、CO气体浓度相互间不具备明显的正相关性，

因此未作预警通报；而在16~20日之间，各变量间的均呈现明显正相关性，微纳粒子浓度连续4日均存在突变趋势，故满足预警条件，发出三级预警。运维人员前往AH3高压开关柜进行排查，巡查发现高压开关柜出线端B相接头处的绝缘层有明显烧灼痕迹。

综上，基于STL-Attention相结合的时序预测模型来评估微空间环境下电气设施局部放电的发展趋势，对预防电气火灾、电气故障事件具备一定的实用性及有效性。

结束语

本文对牵引变电所中电气设施故障风险展开陈述及相关技术问题探讨，主要解决高压开关柜、进/出线柜、PT柜等微空间电气设施环境下的故障预警问题，实现极早期故障风险的评估。具体是通过检测电气设施出现局部放电所引发的关键信息状态量，包括微纳粒子浓度、特征气体浓度、柜内温度等，基于STL-Attention相融合的时序分解法对各类状态量的数据发展趋势进行预测，使得能够明确数据的走势，并依照各类状态量之间的相关性对预警等级进行辅助评判，若均满足正相关性则发出三级

预警。该方法通过实际应用进行验证，能够有效监测到微空间电气设施间出现的局部放电，从而最大限度避免电气火灾、电气故障事件的发生，达到预期应用成效。EA

(收稿日期：2025-06-24)

参考文献

- [1] 罗少和. 铁路牵引变电设备安全性提升措施[J]. 中国科技期刊数据库工业A, 2023(7): 1-4.
- [2] 桂俊华. 基于风险管理的铁路供电维修安全管理研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2021.
- [3] 王潘潘, 刘磊, 杨凯, 等. 牵引变电设备状态感知与分析系统方案研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(2): 1-3, 9.
- [4] 王鹏飞, 张喆, 樊新学. 基于Mie散射理论的粉尘浓度测量研究[J]. 科技创新与应用, 2021(33): 67-71.
- [5] 李飞宏, 肖迎群. 基于STL-LSTM-TCN模型的短期负荷预测方法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(7): 47-51, 56.

