

气体绝缘输电线路 (GIL) 监测方法综述

邓川, 刘扬, 李建

(三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂, 四川 宁南 615400)

摘要: 现如今, 气体绝缘输电线路 (gas-insulated transmission line, GIL) 在电力传输领域日益重要。GIL 结合了电缆和架空传输线的优点, 具有更好的传输性能, 具有极大的潜在应用价值。但是, 由于其自身结构的不稳定等特点, 容易产生一系列的故障, 从而严重影响传输性能和安全性能。因此, 文章综述了 GIL 目前常用的监测方法。介绍了 GIL 的结构以及自身的特点和优势, 根据在监测过程中监测的故障类别把 GIL 的监测方法分为三大类, 分别为局部放电故障的监测方法、结构缺陷故障的监测方法、过热故障的监测方法, 并对每类方法进行了概述和分析, 同时分析了其具体的应用环境和实施方式, 然后对 GIL 传输系统的监测面临的技术挑战进行了探讨, 最后对其未来潜在的发展趋势做了展望。

关键词: 电力传输线; 气体绝缘输电线路; 监测; 故障检测

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.07.004

中图分类号: TM726

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)07-0037-09

Review of gas-insulated transmission line (GIL) monitoring methods

DENG Chuan, LIU Yang, LI Jian

(Ningnan Baihetan Power Plant, Three Gorges Jinsha River Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd., Ningnan 615400, Sichuan, China)

Abstract: Nowadays, gas-insulated transmission line (GIL) is playing an increasingly important role in the field of power transmission. It combines the advantages of cable and overhead transmission line, featuring with superior transmission performance and great potential application value. However, due to its own structural instability and other characteristics, it is easy to produce a series of faults, which seriously affects its transmission performance and safety performance. Therefore, this paper reviews some common monitoring methods for GIL. Firstly, it introduces the structure of GIL as well as its own characteristics and advantages, and then, according to the category of faults monitored in the monitoring process, the monitoring methods of GIL are divided into three major categories, which are the monitoring methods for partial discharge faults, structural defects faults, and overheating faults, and each category of methods is outlined and analyzed. Meanwhile, the specific application environment and implementation methods are analyzed. Each type of method is outlined and analyzed, and its specific application environment and implementation method are analysed. Secondly, the technical challenges faced by the monitoring of the transmission system of GIL are discussed. Finally, the potential future development trend of the proposed method is outlooked.

Keywords: power transmission line, gas-insulated transmission line, monitoring, fault detection

0 引言

随着“西电东送”工程的发展以及区域联网的建设, 迫切需要发展大容量、远距离的超、特高压输电技术。传统的输电方式多采用架空线路或者电力电缆, 容易受到风、雪、雨、雷、雾霾等环境因素的影响, 并且在长期运行过程中难以避免产生绝缘劣化或老化问题, 对电网的安全运行和传输性能构成

严重威胁。目前, 气体绝缘金属封闭输电线路 (gas-insulated transmission line, GIL) 作为可能取代架空输电线路以及电力电缆的替代方案, 在大容量、长距离输电领域已经得到日益广泛的应用^[1]。

GIL 技术的首次应用出现在 1972 年, 美国公共服务企业集团 (public service enterprise group, PSEG) 公司在新泽西州中架设了世界上第 1 条 GIL 线路^[2]。而在中国, 一直到 20 世纪 90 年代初期, GIL 设备才开始在我国得到应用^[3]。我国敷设第 1

基金项目: 中国长江电力股份有限公司科研项目 (Z532302029)

条的 GIL 线路为天生桥水电站 500 kV GIL, 由 CGIT 公司 1992 年制造, 单相长度 50 m, 额定电流 2 kA。1998 年, 广东岭澳核电站也使用了 CGIT 公司制造的 500 kV GIL 设备, 用于连接主变压器和 GIS 设备, 单相长度 3 008 m, 额定电流 2 kA, 采用隧道敷设。2004 年, 华东电网公司的首条 500 kV GIL 在浙江瓶窑变电站投运^[4]。目前, GIL 技术已经越来越成熟, 在我国投入的项目也越来越大。2019 年投入运营的江苏苏通的 GIL 综合管廊工程是全球电压等级最高, 输送容量最大, 技术水平最高的超长距离 GIL 创新工程, 融合了特高压 GIL 技术和泛在电力物联网等前沿技术, 得到了国内以及国际上的广泛认可和称赞。

但是, 在实际 GIL 的传输过程中, 其总会发生各种各样的故障。例如绝缘故障, 受热故障或者因为外界环境的影响导致其传输性能受损等^[5]。因此, 对 GIL 各项数据和指标进行监测至关重要。

为此, 鉴于电力线监测对实际 GIL 传输的重要性以及 GIL 日益增长的使用和监测需求, 文章针对 GIL 的监测方法进行了综述。对 GIL 进行了描述, 并对其主要的监测需求进行了说明; 将 GIL 的监测方法分为三类, 分别是针对局部放电故障的监测方法、针对结构缺陷故障的监测方法、针对过热故障的监测方法。同时, 还分析和比较了各方法之间的特点以及优势, 并讨论了目前还需完善和克服的技术问题, 最后对未来电力线监测的发展趋势进行了展望。

1 GIL 及其主要监测需求

在电力传输的过程中, 对电力线的选择极为关键。架空传输线和电缆是目前使用最多的两种输电线路, 其自身均有着不错的传输性能。架空输电线通常由裸露的导体(如铝或钢芯铝绞线)组成, 悬挂在塔架上, 用于在开阔地区进行长距离输电。电缆由绝缘材料包裹的导电导体组成, 可以设在地下或者水下, 应用场景更加广阔。

GIL 结合了两条输电线路的优势和特点, 采用金属外壳封闭导电杆、压缩气体(如 SF₆、SF₆/N₂ 混合气体和环保气体等)绝缘、外壳与导电杆同轴布置的电能传输设备, 可用于连接架空线、GIS、变压器和开关设备等, 其具体结构如图 1 所示^[6]。与架空输电线相比, 其传输损耗更低, 电压调节能力更强, 且不需要外部补偿设备或设备来改善电压特性, 因此使得 GIL 成为未来电力传输的最佳解决方案, 特别是

在电网互联和新的海上及陆上输电线路方面^[7]。



图 1 GIL 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GIL structure

同时, 在电路传输的过程中, 无论是架空输电线、电缆还是 GIL, 其均存在着一定的故障隐患。GIL 主要的故障可以分为三类, 分别为机械故障、放电故障以及过热故障。机械故障主要由于其线路的结构缺陷所导致的, 尤其是其绝缘子部分。GIL 的放电故障可能是由于母线气体室内存在自由导电粒子、导体插入不当、浮空电位、尖端电晕放电、绝缘材料缺陷或焊接缺陷等原因造成的^[8]。对于 GIL 的过热故障, 主要是因为 GIL 导体的焦耳热损耗产生热量使温度升高, 同时热交换使绝缘气体升温, GIL 壳体感应电流热损耗与涡流热损耗共同作用, 引起导体、壳体和绝缘气体温度的大幅升高^[9], 最终可能会破坏绝缘性能, 或者因为热膨胀导致结构变形等故障。因此, 需要对 GIL 运行状态、主要参数进行实时监测, 及时发现故障, 确保电力的安全、可靠传输。接下来, 我们将对 GIL 在输电过程中的状态监测方法进行研究和分析。

2 GIL 监测方法

结合具体文献分析现如今电力线监测技术, 如图 2 所示, 根据在监测过程中针对 GIL 的故障类型, 可以大致将其分为三大类, 分别为针对局部放电故障的监测方法、针对结构缺陷故障的监测方法、针对过热故障的监测方法。

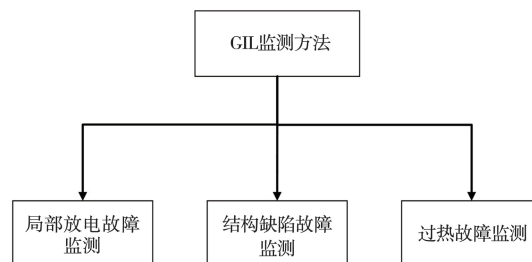


图 2 GIL 监测方法的分类

Fig. 2 Classification of GIL monitoring methods

2.1 局部放电故障监测

在这类监测方法中,主要是通过一系列手段来监测局部放电后高能电子在强电场作用下获得足够的能量,撞击气体分子使其电离产生的自由电荷载体以及周围集中形成的电场,从而判断是否产生局部放电。

对于 GIL 来说,局部放电 (partial discharging, PD) 是最常见的故障监测。当局部放电 PD 发生时,它会在设备内部产生快速的电流脉冲,这些脉冲以电磁波的形式传播,并被超高频 (ultra high frequency, UHF) 传感器捕获。然后对接收到的信号进行信号处理后,再提取出 UHF 信号的幅度、频率成分和时间特性,并通过计算对 PD 进行定位。因此,UHF 传感器的设计十分重要。文献[10]所设计的双边带传感器设计为具有双槽平面天线,由一个空气填充的腔体支撑。双插槽布置允许天线的不同部分在 UHF 频谱的不同频率范围产生共鸣。因此,与其他阻隔传感器相比,这种设计使得传感器在 UHF 范围内具有宽频带响应和高灵敏度。文献[11]提出的 UHF 传感器是一种紧凑型的圆锥形单极天线,带有地面平面和保护性 radome,与现有的 UHF 传感器相比,所提出的传感器具有更宽的带宽、更小的孔径尺寸和定向辐射模式。此外,所提出的传感器还配备了 radome,为传感器提供了电气隔离和保护,具有更好的检测能力和灵敏度。同时在天线的设计上,文献[12]提出了一种基于 LS Peano 分形结构的微带天线,其在考虑天线体积和带宽的同时,具有 $50\ \Omega$ 的输出阻抗,易于与信号传输线形成阻抗匹配。天线检测频带宽, VSWR 小于 2,具有椭球形方向性,对弱信号具有高灵敏度。

同时,当局部放电 PD 发生时,其还会产生较大的光辐射。为此,文献[13]提出在 GIL 内侧壁上安装光学指纹传感器,其中包括四个实际传感器和若干个虚拟传感器,再利用自适应神经模糊推理系统 (adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) 通过已知的 ASs 检测值来预测未安装传感器位置的 VSs 的检测值。再由 ASs 和 VSs 组成的 PD 检测指纹与模拟指纹数据库进行匹配,然后使用支持向量机 (support vector machine, SVM) 算法进行匹配,确定与最佳匹配结果对应的位置作为 PD 源的定位,其

具体实现方式如图 3 所示。

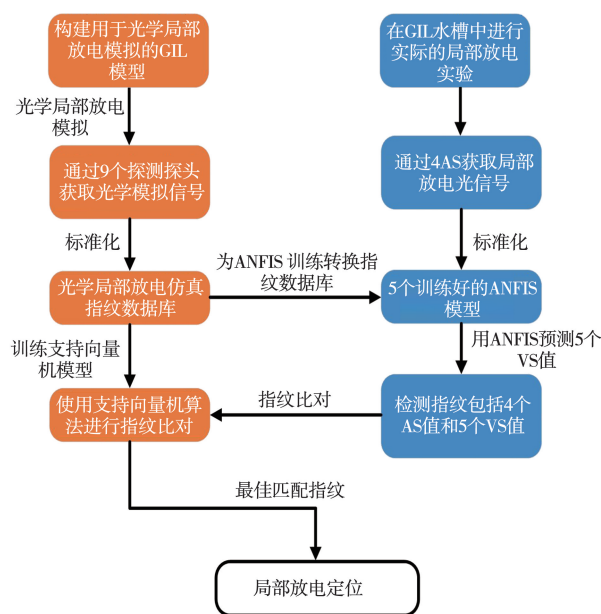


图 3 自适应神经模糊推理系统具体实施方式

Fig. 3 Specific implementation method of adaptive neural fuzzy inference system

针对 GIL 的局部放电监测的问题,由于分解产物在径向上会因对流而迅速扩散,文献[14]提出了设计一种气体传感器来接收和监测扩散的气体,依据不同气体的扩散系数的不同,可以通过气体传感器轴向阵列检测到的浓度延迟,从而定量地定位局部放电位置。

超声波传感器在电力线监测中的应用也非常广泛。例如文献[15]根据 GIL 传输过程中发生局部放电时会产生特定频率的特点,设计了一款超声波传感器来接收其发射的信号,并将接收到的信号进行放大和滤波,通过分析信号的特征 (如幅度、频率等) 来判断是否存在异常放电,再通过分析从不同传感器收集到的信号的时间差和振幅差异,确定故障位置。在此基础上,文献[16]提出使用更高精度的超声波传感器阵列,并使用窄带共振型压电陶瓷超声波传感器,其具有特定的频带宽度和谐振频率。通过分析从不同传感器收集到的信号的时间差和振幅差异,结合传感器布局和信号传播路径,确定故障位置。同时,利用超声波的反射原理,还可以监测 GIL 传输中支柱绝缘子的缺陷问题。

2.2 结构缺陷故障监测

在这类监测方法中,其通过一系列监测手段对

GIL 由于老化,腐蚀以及其他一些外界因素造成的外部的金属部件的缺陷以及内部绝缘子部件的缺陷进行监测,从而判断有无结构缺陷。

在 GIL 实际传输的过程中,可以利用常用的一些机器学习算法实现对 GIL 结构缺陷的监测。例如文献[17]中提到的使用 YOLOv5x (you only look once v5x) 模型对无人机监测得到的 GIL 实时图像进行处理,并引入 K-means 聚类方法来优化边界框预测。通过分析不同模型的检测结果,确定 YOLOv5x 模型结合 K-means 聚类在绝缘子缺陷检测中表现最佳,达到 86.8% 的准确率和 95.5% 的 MAP。文献[18]中提到了一种改进后的 YOLOv3 算法,其通过应用残差跳跃连接解决深度网络的梯度消失问题,并在三个不同尺度上执行目标检测过程。引入随机特征金字塔 (recursive feature pyramid, RFP), RFP 通过随机选择特征图的一半来构建最终特征图,以增强对小尺寸缺陷的检测能力。同时引入焦点损失函数来动态调整交叉熵损失,使模型在训练过程中更多地关注难以分类的样本。该方法在召回率和精确度方面相比于传统的 YOLOv3 (you only look once v3)、SSD (single shot multibox detector) 和 Faster-RCNN (faster region-based convolutional neural networks) 等方法有所提升。特别是在处理小尺寸对象时,焦点损失函数的应用使得模型的表现更佳。

同时,还可以使用一些深度学习算法提高对结构缺陷检测的精度。例如,文献[19]提出了一种优化的 YOLOx 级联结构,具有更快的检测速度,能够很好地实现实时监测的效果。文献[20]提出了一种改进的 RetineNet 结构,其增加了注意力门 (attention gate, AG) 模块,以提高对缺陷特征的识别能力,相比于 YOLOv3 等算法具有更好的识别和检测效果,其具体性能对比见表 1 所示。

表 1 常用深度学习的监测方法性能比对

Tab. 1 Performance comparison of common-used deep learning monitoring methods

算法	平均精度/%	浮点运算次数	参数数量/M
Faster R-CNN	58.00	1.2×10^{11}	47.3
YOLOv3	56.70	3.3×10^{10}	61.9
YOLOv5	59.41	1.3×10^9	7.2
RetineNet	65.70	1.3×10^{11}	36.4
AG-RetineNet	72.05	1.3×10^{11}	37.8

不仅如此,超声波技术在 GIL 传输过程中也可以很好地实现对其结构缺陷的监测。超声波在无缺陷的支柱绝缘子基座中传播时,会遇到不同的声阻抗界面,导致部分波反射回来。且支柱绝缘子有无缺陷会影响反射的角度和反射信号的幅度,因此可以通过测量反射波的时间差异和振幅,可以推断出材料的厚度和潜在的界面缺陷^[21-22]。同时,直接使用 X 射线也是一种常用的监测方法。在文献[23]中提出了一种基于 X 射线成像技术对 GIL 内部机械类型缺陷的检测方法,其主要利用 X 射线视觉检测系统对 GIL 设备进行视觉在线检测,能够及时有效地检测出母线、开关设备部件等部位的结构缺陷。

2.3 过热故障监测

在这类监测方法中,通常使用一系列监测方法对 GIL 外壳以及内部气体的温度进行监测,判断其是否处于过热或其他异常状态,从而影响 GIL 的绝缘性能以及传输性能等。

在 GIL 传输过程中,对于温度的监测通常使用传感器进行监测,并对传感器获取的温度数据进行处理和计算,从而判断 GIL 是否处于过热或者其他异常状态。例如,文献[9]提出了一种基于红外温度传感器监测 GIL 运行状态的方法,通过建立三维有限元模型对 GIL 进行测温,然后对测得的温度数据进行预处理,再与正常运行状态下的壳体温度值 (即门限值) 进行比对,当监测到的壳体温度超出此门限值时即判定为异常状态。文献[24]在文献[9]的基础上提出了一种通过监测 GIL 壳体温度并利用其热特性差异来实现故障辨识的新方法。其首先研究了 GIL 温度场,定义了温度变化率及其范围作为描述不同状态下热特性差异的判据,在与正常状态下计算得出的温度变化率进行比对,若存在明显热特性差异则判断 GIL 处于过热或其他异常状态。

对于传感器的使用,除了上述提到的红外温度传感器,文献[25]还提出了另外两种接触式的温度传感器,可以部署在 GIL 内部或者外壳上进行实时测温。第一种是电热偶温度传感器,其主要依据电热偶温度传感器的动态特性,得到待测温度与测试温度之间的线性关系,其具体表示如下:

$$MC_p \frac{dT}{dt} = hA(T_e - T)$$

(1)

计算得出其实时测得的温度表示为:

$$T - T_0 = (T_e - T_0)(1 - e)$$

(2)

式中: M 为传感器换热部分的质量; C_p 为传感器材料的比热容; T_0 表示传感器的初始温度; A 为面积; t 为响应时间; T_e 为环境阶跃温度。第二种为温敏电阻式温度传感器,其主要依据不同温度下对应不同的电阻值的原理,只需测量温敏电阻的电阻值即可得知其实时温度值。同时,此传感器还具有灵敏度高,工作误差小,工作温度范围宽以及体积小等优点,能精确检测出 $6 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化值,且使用起来也较为方便。

同样的,使用常用的一些机器学习算法也可以实现对温度的监测。例如文献[26]提出使用基于蒙版区域的卷积神经网络(mask region-based convolutional neural network, MASK R-CNN)算法对采集到的图像进行数值计算和图像处理,识别不同组件、灰度差分操作,从而对 GIL 表面温度进行估计,实现对 GIL 的温度监测,可以较好地解决使用传感器测温时测量精度不高等问题,其具体操作和流程如图 4 所示。

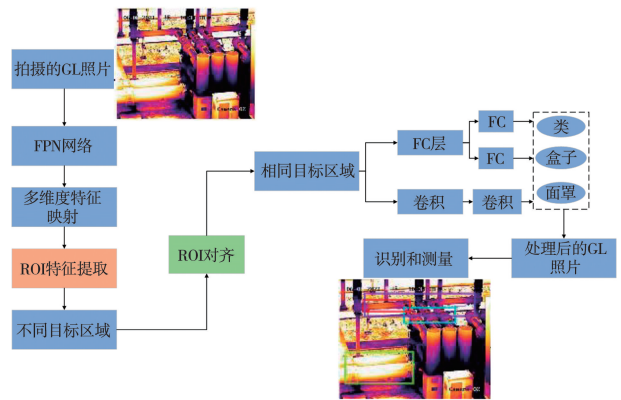


图 4 MASK R-CNN 算法具体操作和流程
Fig.4 Specific operations and processes of MASK R-CNN algorithm

2.4 监测方法汇总

上述提到的三类监测方法的总结以及其各自的优缺点如表 2 所示。当然,在 GIL 实际传输过程中还会存在其他类型的故障,例如 GIL 内部可能会存在一些金属异物,尤其是微细的金属粉尘,这些金属异物可能会吸附在绝缘子表面,从而改变电场分布,影响绝缘性能和传输性能等。由于篇幅有限,文章只针对上述提到的三种故障类别总结和分析其对应的监测方法。

表 2 GIL 监测方法汇总
Tab.2 Summary of GIL monitoring methods

监测类别	监测方法	优缺点
局部放电故障监测	DSB 传感器	工作频率覆盖范围大,且灵敏性较高,但在安装上需要适应其特定的形状和尺寸,且容易受到周围电磁场的干扰。
	UHF 传感器	工作频率覆盖范围大,且具有雷达罩保护,可以避免外界环境的干扰,但制造成本和难度较大,且安装复杂。
	光学指纹传感器	抗干扰性强,识别精度高,且风险和成本较低,但技术难度较大,且依赖于仿真模型的准确性。
	气体传感器	识别准确性高,计算量较小,监测效率较高,但实现难度较大,且需要的监测时间较长。
	超声波传感器	采用非接触性监测,提高了监测的安全性和便捷性,且识别较为准确,但涉及电路较为复杂,实际搭建难度较大,且不能较好地实现远距离监测。
结构缺陷故障监测	YOLOv5x 算法	算法识别精度高,监测效率高,同时适应性强,可以有效识别多种环境下的结构缺陷故障,但算法要求较高,需要较多的计算资源和庞大的数据集支撑,且训练时间较长。
	超声波技术	操作灵活便捷,可以在不同的现场条件下使用,且像素较高,识别精度较高,但超声检测可能受到材料属性、缺陷位置和形状的影响,某些情况下可能无法检测到所有类型的缺陷。
	X-射线	监测精度和效率较高,且适应性强,可以适应不同的地形环境,同时也提高了监测的安全性和可实施性,但监测成本较高,对某些特定类型的缺陷(如微小裂纹)的检测存在局限性,同时对设备内部结构的复杂性敏感。
过热故障监测	红外温度传感器	环境适应能力强,且便于实施,较为方便,但传感器精度和数据的稳定性和准确性较差。
	热差异特性	灵敏度较高,且工作频率覆盖范围较广,适应性强,但在实际监测时容易受到环境因素的干扰。
	图像识别与处理有限元法	识别准确度高,且效率较高,但对技术要求较高,成本也较高,且容易受到环境因素的干扰。算法模型的准确度高,适应能力强,但计算复杂度高,且容易受到试验环境的影响。

3 研究重点以及技术挑战

在 GIL 监测领域中,存在着以下几个方面的研究重点:

1)利用更高精度的传感器和智能化的监测系统,实时监测输电线路的各项参数,如温度、电流、电压等,并通过数据分析和处理来判断输电线路的工作状态和健康状态。

2)使用更高性能的人工智能算法,对常用的 GIL 监测算法和模型进行优化,建立智能化监测系统和模型,对输电线路进行更精确的异常诊断和故障监测。例如文献[27]提出的,通过互补集合经验模态分解模糊熵值与鲸鱼优化极限学习机模型联合方法对 GIL 机械故障模式进行识别与诊断等。同时,还可以使用搭载高精度图像识别与处理算法的无人机进行辅助监测,确保监测的准确度,同时减少监测的时间和成本。例如可以使用 YOLOv5 等图像处理算法结合无人机对电力线的传输进行监测等^[28-29]。

3)使用物联网技术,将传感器网络、无线通信、云计算以及大数据技术有机结合,实时上传和处理监测到的数据,并对得到的数据进行智能处理,自动判断 GIL 的工作状态和健康状态,打造出具有实时性、可靠性以及多功能性的智能监测系统。

4)使用混合气体来减少 GIL 中 SF₆ 气体的比例,或者使用其他气体来代替 SF₆ 气体的作用。如第二代 GIL 技术提出使用 N₂ 气体与 SF₆ 气体混合,以及第三代气体提出使用八氟环丁烷或者 CF₃I 气体来代替 SF₆ 的作用^[30]。

5)对现有的 GIL 的结构进行优化,例如文献[31]提到的对 GIL 三支柱绝缘子中支柱部分倾斜度的控制及金属嵌件的结构进行优化和采用更优结构的绝缘子进行传输等。

同时,虽然在第二部分中提到的 GIL 监测方法可以很好地实现电力线的监测,且具有很高的准确度和计算速度,但在实际的 GIL 传输中,其监测仍面临着以下一些技术挑战:

1)大型 GIL 传输系统的试验可能会遇到尺度效应,这意味着实验室规模的测试结果不能完全适用于实际的大规模传输系统,因此在实验室进行仿真测试的同时还需考虑怎么确保实际大型传输系统的传输性能和安全性能。

2)GIL 系统在模拟仿真时产生的数据量通常很大,需要更高性能的数据处理算法和分析工具来提取其中的有用信息,并对潜在的故障进行精确地预测。

3)在实际的 GIL 传输系统中,随着时间的推移和负载量的增大,GIL 传输系统的结构完整性可能会遭到破坏,例如可能会产生微小的形变和裂缝以及其他的一些细小的结构损伤,影响传输性能。同时,这些微小的结构损伤对监测系统监测的精度考验较大。

4)GIL 传输系统的绝缘子在实际运行中可能会受到复杂的电场和外界环境的影响,在实验室进行模拟实验时需要精确模拟绝缘子的性能才能保证搭建的 GIL 传输系统可以长期稳定地运行。

5)无人机在图像采集过程中难免存在相机抖动、光线变化,导致图像模糊、颜色强度变化较大,从而影响电力线特征的准确提取,对算法性能要求过大^[32]。同时,无人机图像检测算法在使用非深度学习算法时精度和性能较低,无法满足要求,且在使用深度学习算法时对硬件的要求较高,成本也较高,无法大规模投入到使用中。

6)目前现有的传感器精度较低,计算不够精确,且无法抗振,容易受到环境的影响,在实际监测中得到的监测结果非常不稳定且不准确。

7)GIL 虽然可以很好地解决外界环境对电力传输的干扰问题,但其本身制造过程非常复杂,需要考虑多种因素,包括气压、温度等,且其传输条件较为苛刻,需要保证高度的可靠性绝缘。同时,由于 SF₆ 气体具有较强的温室效应,对环境影响极大。

4 发展趋势

在面对上述技术挑战的同时,电力线监测技术也具有以下的一些潜在的发展趋势:

1)在对 GIL 传输系统进行监测时,不仅仅只关注和测量电气方面的参数,如电流、电压等,还应关注环境的监测和结构健康的监测,以确保 GIL 在不同环境下均能安全稳定地运行。

2)采用负反馈的方式提高数据的精度,例如可以搭建负反馈控制系统对输电系统进行精密控制,使系统更加完善和精细。同时与物联网技术相结合,快捷和高效处理监测的数据并进行实时分析和上传,能有效地提高系统的实时性和自动化程度。

3)在确保高效和准确监测的同时,考虑对环境的影响,向节能减排方向努力,例如可以通过优化监测系统的能耗来减少对环境的影响。

4)通过辅助工具进行验证,如使用X射线以及超声波等来验证所使用的监测算法和模型的可靠性和准确性,同时也可以借助无人机来对电力线进行巡检,再结合图像处理算法使其检测结果更加精确。

5)依据传输系统过去的状态,建立机器学习模型对未来的运行状态进行预测,帮助获取和识别异常状态的发生,如可以利用改进后的LSTM模型对电力设备状态进行预测等。

6)搭建集成声纹识别,图像处理等算法以及AI自动监测和预警的检测系统进行监测,实现更精细化的监测^[33]。

7)采取多数据融合的方式,对多项数据进行监测,然后对数据进行加权融合,建立更精确的预测模型进行监测,或者如文献[34]所提到的考虑之前状态的影响,构建高维时空状态监测矩阵,每个多时段高维时空状态监测矩阵由20个单时段多特征量状态监测矩阵扩展而成。

5 结论

面向电力线传输领域,针对GIL的监测方法及其应用进行了综述。首先交待了GIL监测技术的重要性和必要性,其次对比目前主流的两大电力线类型,介绍了GIL自身的特点以及优势。然后针对目前主流的GIL监测方法,将其按照监测故障类别分成三大类,包括针对局部放电故障的监测方法、针对结构缺陷故障的监测方法、针对过热故障的监测方法,并分别对其进行总结和归纳。接着对GIL监测行业目前所面临的技术挑战进行了分析,最后探讨了该行业未来潜在的发展趋势。虽然GIL监测行业仍面临着较多的一些挑战和困难,但由于现如今对电力线传输要求越来越苛刻以及GIL自身潜在的优势,其在电力线传输的应用必将越来越广,对于GIL的监测需求也必将越来越大。

参考文献

- [1] 郝宇亮,陈家伟,李宣健楠,等. 特高压交流GIL气密性检测分析和试验研究[J]. 高压电器, 2025, 61(7): 203-207, 233.
HAO Yuliang, CHEN Jiawei, LI Xuanjiannan, et al.

Study on gas tightness detection analysis and leak test of UHV AC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(7): 203-207, 233.

- [2] KOCH H, HOPKINS M. Overview of gas insulated lines [C]//Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA: IEEE, 2005: 940-944.
[3] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and application prospect of gas-insulated metal-enclosed transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
[4] 刘兆林. 500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路在华东电网的应用[J]. 华东电力, 2006, 33(12): 81-83.
LIU Zhaolin. Applications of 500 kV GIL to east china power grid[J]. East China Electric Power, 2006, 33(12): 81-83.
[5] 陈静,曹鸿,李国良,等. 一起500 kV GIL管母支柱绝缘子故障分析[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 190-196.
CHEN Jing, CAO Hong, LI Guogen, et al. Fault analysis of a support insulator for 500 kV GIL tubular busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 190-196.
[6] 肖登明,阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.
XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission lines (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.
[7] HABIBURRAHMAN A, ARYA L D. Comparison of transmission losses and voltage regulation of overhead and gas insulated transmission line [C]//2020 IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering (ICADEE). IEEE, 2020: 1-6.
[8] LI Y, ZANG C, JIANG L, et al. Analysis on common faults of gas insulated transmission line [C]//2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). IEEE, 2020: 248-253.
[9] 李洪涛,丁然,赵科,等. 基于温度变化特征的GIL状态辨识系统研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 49-56.
LI Hongtao, DING Ran, ZHAO Ke, et al. Research on GIL state identification system based on temperature change characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 49-56.
[10] ZACHARIADES C, SHUTTLEWORTH R, GIUSSANI R.

- A dual-slot barrier sensor for partial discharge detection in gas-insulated equipment[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(2): 860-867.
- [11] YADAM Y R, RAMANUJAM S, ARUNACHALAM K. An ultra wideband conical monopole with radome for detection of partial discharges[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18764-18772.
- [12] WU T, YANG Q, JIANG C, et al. Design of partial discharge UHF microstrip antenna based on LS peano fractal structure[C]//2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2021, 5: 556-560.
- [13] ZANG Y, QIAN Y, WANG H, et al. A novel optical localization method for partial discharge source using anfis virtual sensors and simulation fingerprint in GIL[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3522411.
- [14] QIU R, ZHOU W, BRAULT P, et al. A method to localize the axial position of partial discharges in GIL by gas sensors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 263-270.
- [15] LI T, SONG B, LIU Y, et al. Research on ultrasonic detection technology of overhead distribution line[C]//2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA). IEEE, 2021: 938-942.
- [16] XU H, ZHANG P, CHENG L, et al. Design of UHV long-distance GIL fault location system based on ultrasonic method[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2020: 3296-3301.
- [17] FENG Z, GUO L, HUANG D, et al. Electrical insulator defects detection method based on YOLOv5 [C]//2021 IEEE 10th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). IEEE, 2021: 979-984.
- [18] SHOUGUO L, KAI L, YAOHUA Q, et al. Automatic detection method for small size transmission lines defect based on improved YOLOv3[C]//2020 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE). IEEE, 2020: 78-81.
- [19] QI Y, HUO Y, LIU S, et al. Optimized YOLOX based Transmission line bolt cascade detection[C]//2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2022: 2099-2102.
- [20] DU W, ZHANG M, SHI X, et al. Transmission line defect detection based on AG-RetinaNet[C]//2021 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). IEEE, 2021: 1-6.
- [21] LI W, ZHOU F, ZHENG Y, et al. An ultrasonic detection method for interface defects of three post insulators in gas-insulated transmission lines[C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2020: 1-5.
- [22] 梁进祥, 徐偲达, 张虎. 高压输电线路复合绝缘子硅橡胶内部缺陷超声检测[J]. 绝缘材料, 2024, 57(1): 68-73.
- LIANG Jinxiang, XU Sida, ZHANG Hu. Ultrasonic testing of internal defects of composite insulator silicone rubber for high voltage transmission lines[J]. Insulating Materials, 2024, 57(1): 68-73.
- [23] LIU J, WANG Z, LANG Y, et al. Research on X-ray detection robot system for gas insulated switchgear or transmission line[C]//2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2022: 2443-2448.
- [24] 赵科, 丁然, 李洪涛, 等. 基于热特性差异的 GIL 故障辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 13-20.
- ZHAO Ke, DING Ran, LI Hongtao, et al. Research on GIL fault identification based on differences in thermal characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 13-20.
- [25] 朱海峰, 柏彬, 刘寅莹, 等. GIL 温度监测及热问题解决方法研究综述[C]//中国电力科学研究院. 2018 智能电网信息化建设研讨会论文集. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院; 国网江苏省电力工程咨询有限公司. 2018: 5.
- ZHU Haifeng, BAI Bin, LIU Yingying, et al. A review of research on GIL temperature monitoring and thermal problem solving methods[C]//China Electric Power Research Institute. Proceedings of 2018 Smart Grid Informatisation Construction Workshop. Economic and Technical Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd; State Grid Jiangsu Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd. 2018: 5.
- [26] ZHAO K, LI H, GAO S, et al. Deep learning based infrared image recognize and internal overheating fault diagnosis of gas insulated switchgear[C]//2021 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the

- era of Artificial Intelligence(ICSMD). IEEE, 2021: 1-5.
- [27] 王立宪, 马宏忠, 戴锋. GIL 机械故障诊断与预警技术研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(8): 106-113.
- WANG Lixian, MA Hongzhong, DAI Feng. Research on GIL mechanical fault diagnosis and early warning technology[J]. Electrical Machines and Control Applications, 2021, 48(8): 106-113.
- [28] 于子涵, 王赫鸣, 王建凯, 等. 基于无人机巡检的输电线路绝缘子及其异物检测算法[J]. 发电技术, 2025, 46(3): 532-540.
- YU Zihan, WANG Heming, WANG Jiankai, et al. Detection algorithm for insulators and foreign objects on transmission lines based on unmanned aerial vehicle inspection[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(3): 532-540.
- [29] 芦肇基, 沈艳霞, 谭永强. 基于多结构融合 WGAN 的模糊绝缘子图像复原方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 166-175.
- LU Zhaoji, SHEN Yanxia, TAN Yongqiang. A WGAN blur insulator image restoration method based on multi-structure fusion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 166-175.
- [30] 刘军. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 219-220.
- LIU Jun. Application and development of gas insulated transmission lines (GIL)[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(23): 219-220.
- [31] 李鹏, 颜湘莲, 王浩, 等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-3167.
- LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of extra-high voltage AC GIL transmission technology[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.
- [32] 韩汉贤, 罗金满, 刘丽媛, 等. 基于无人机图像的输电线路部件检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 198-203.
- HAN Hanxian, LUO Jinman, LIU Liyuan, et al. Research on detection method of transmission line components based on UAV image[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 198-203.
- [33] 马爱清, 张成武, 徐进帅, 等. 基于姿态估计的输电线路带电作业的人体数字孪生研究[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 21-32, 53.
- MA Aiqing, ZHANG Chengwu, XU Jinshuai, et al. Research on human digital twins for live working on transmission lines based on attitude estimation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 21-32, 53.
- [34] 赵庆周, 李勇, 田世明, 等. 基于智能配电网大数据分析的状态监测与故障处理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 774-778.
- ZHAO Qingzhou, LI Yong, TIAN Shiming, et al. A state estimation and fault processing method based on big data analysis of smart distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 774-778.

收稿日期: 2025-01-14; 修回日期: 2025-07-29

作者简介:

邓川(1988—),男,通信作者,工程师,研究方向为电气一次设备运维。E-mail: deng_chuan@ctg.com.cn

刘扬(1984—),男,高级工程师,研究方向为电气一次设备运维。

李建(1971—),男,技师,研究方向为电气一次设备运维。

(编辑 田春雨)