

基于人工智能技术的电力系统故障诊断方法研究

张泽栋¹, 刘光源²

1. 国网武汉供电公司汉口供电中心, 湖北 武汉 430000

2. 国网神农架供电公司调控中心, 湖北 神农架 442400

DOI:10.61369/EPTSM.2025080016

摘 要 : 电力系统稳定运行对社会经济极为重要, 故障若不能及时诊断会造成严重后果, 传统故障诊断方法效率低、适应性差等弊端突出, 人工智能技术为解决这一困境带来新途径。本文梳理人工智能在电力系统故障诊断中的应用状况, 剖析各种诊断方法的原理与特性, 阐述研究的理论与现实意义, 希望给改善电力系统故障诊断的准确度与时效性给予参照, 助力电力系统安全稳定运行。

关 键 词 : 人工智能技术; 电力系统故障; 诊断方法

Research on Fault Diagnosis Method Of Power System Based on Artificial Intelligence Technology

Zhang Zedong¹, Liu Guangyuan²

1. Hankou Power Supply Center of State Gridhan Power Supply Company ,Wuhan, Hubei 430000

2. State Grid Shennongjia Power Supply Company Dising Center, Shennongjia, Hubei 442400

Abstract : The stable operation of the power system is extremely important for the social economy. If the fault cannot be diagnosed in time, it will cause serious consequences. The traditional fault diagnosis method has low efficiency and poor adaptability, etc., and the artificial intelligence technology brought new ways to solve this dilemma. This paper combs the application status of artificial intelligence in power system fault diagnosis, analyzes the principles and characteristics of various diagnosis methods, andounds the theoretical and practical significance of the research, hoping to give a reference for improving the accuracy and timeliness of power system fault diagnosis, and contribute to the safe and stable of the power system.

Keywords : artificial intelligence technology; power system fault; diagnosis method

引言

电力系统属于国民经济的关键基础设施, 随着电力负荷增长及电网结构复杂化, 短路, 设备故障等现象频繁出现, 这类故障会导致供电中断, 进而影响工业生产, 居民生活, 甚至诱发大面积停电事故, 带来巨额经济损失和社会影响, 传统故障诊断依靠人工经验和简易监测手段, 无法满足复杂电网的故障诊断需求, 迫切需要高效的, 准确的诊断技术。本研究关注人工智能技术在电力系统故障诊断方面的应用, 通过剖析当前的研究状况, 找出各种 AI 诊断方法的优点与缺点, 彰显研究的关键意义, 搭建起一套系统的故障诊断方法梳理架构, 给之后的相关技术研发及工程应用给予理论上的支撑, 从而促使电力系统达成对故障的迅速, 精确诊断, 保证电网的安全, 可靠运行。

一、电力系统故障诊断现状

(一) 传统故障诊断方法现状

传统电力系统故障诊断方法主要有依靠人工经验的诊断法、依靠数学模型的诊断法、依靠信号处理的诊断法^[1]。依靠人工经验的诊断法依靠运维人员的经验, 诊断效率和准确度受到人员经验的限制, 难以应对突发且复杂的故障; 依靠数学模型的诊断法需要建立准确的电力系统数学模型, 但是实际电网参数容易受到

外界因素的影响, 模型准确度难以保证, 诊断误差大; 依靠信号处理的诊断法依靠对故障信号的特征进行分析, 但在强干扰环境下, 信号特征提取困难, 诊断可靠性降低。目前传统方法在复杂电网故障诊断方面的局限性越来越明显, 难以满足现代电力系统的诊断需求^[2]。

(二) 人工智能在故障诊断中的应用现状分析

随着人工智能技术发展, 其在电力系统故障诊断的应用越发深入, 人工神经网络、模糊逻辑、支持向量机、深度学习等人工

智能技术已经被广泛地应用于故障诊断之中，在输电线路故障诊断方面，部分文献采用了人工神经网络模型，并通过利用训练样本来学习故障特征从而对短路故障类型与故障点进行诊断，诊断的准确率与传统的方法相比也有了一定的提高；模糊逻辑因其具有处理模糊性信息的优势而被用在设备故障诊断当中，它能够很好地应对故障诊断过程中的一些不确定性问题；支持向量机能够在样本少时依旧拥有较好的分类性能，在一些数据样本较少的情况下进行故障诊断也是比较可行的；在故障诊断中使用深度学习的技术，包括卷积神经网络和循环神经网络，可以自动提取故障数据的深层特征并且对复杂的故障模式具有良好的识别效果。但是目前的 AI 技术应用还存在一些问题，比如有些模型训练需要很多高质量的数据样本，但是获取样本比较困难，模型的泛化能力也需要加强，不同电网拓扑结构下的适应性不足等^[3]。

二、基于人工智能技术的电力系统故障诊断研究意义

（一）适配现代电网发展需求

随着智能电网、分布式能源并网、特高压输电技术推广，电力系统“源网荷储”互动，传统诊断技术难以应对多场景、高动态的电网运行状态，人工智能技术可动态学习电网拓扑变化、能源接入特性，诊断模型随之自适应调整，在分布式光伏、风电并网场景，可实时捕捉间歇性电源接入造成的故障特征变化，避免传统方法固定诊断逻辑造成的误判，为现代电网复杂运行场景提供更适配的诊断方案。

（二）推动电力行业技术创新

人工智能与电力系统故障诊断融合，打破传统“经验驱动”诊断模式，构建“数据驱动+智能分析”新体系，促进故障诊断设备升级（智能传感器、边缘计算诊断终端研发），电力行业形成“诊断-预警-修复”闭环技术链，比如基于 AI 的故障诊断技术可与电力物联网结合，实现故障数据实时采集、云端分析，倒逼电力行业在数据治理、智能算法落地等环节开展技术创新，加快行业向数字化、智能化转型^[4]。

（三）提升电力系统安全韧性

极端天气、网络攻击等非正常因素对电力系统安全构成的威胁越来越大，传统方式难于及时判断此类突变、非常规的故障状况，人工智能凭借诸多特征融合分析和异常模式快速判断能力，能有效提升电力系统安全性，比如台风、冰冻等极端天气条件下，人工智能诊断模型可以将气象信息同电网运行状态数据相融合预知线路可能存在的覆冰及杆塔倾斜问题；而遭遇网络攻击针对电力监控系统的状况时，则能够依靠对异常数据模式快速识别，尽早察觉由黑客恶意干预造成的错误故障信号，从而维护电网在复杂环境下正常运转。

（四）推动能源转型与可持续发展

在“双碳”背景下，电力系统要提高清洁能源的接纳水平，新能源发电不稳定容易造成电网故障，AI 故障诊断技术可以快速找出新能源接入环节的故障点，减小因故障造成的清洁能源浪费，改善能源利用率，AI 诊断技术还可以改进故障维修流程，削

减故障处理过程中能源消耗和碳排放，比如准确诊断后可缩减停电时长，减少备用电源启动时间，间接削减化石燃料消耗，从而给电力系统绿色低碳发展给予助力^[5]。

三、基于人工智能技术的电力系统故障诊断方法

（一）基于人工神经网络的故障诊断方法研究

人工神经网络模仿生物神经网络结构和功能，由大量神经元通过连接权值形成网络模型，在电力系统故障诊断时，人工神经网络通过学习历史故障数据样本，创建故障特征与故障类型、故障位置之间的映射联系，在训练期间，采用梯度下降法等改良算法持续调整网络连接权值，促使网络输出误差降至最低，近些年为了改善训练效率，自适应学习率梯度下降，动量梯度下降等改良算法被普遍运用，传统算法收敛速度慢的问题得以解决，在实际诊断应用当中，此方法已应用于变压器故障诊断，通过收集变压器油中溶解气体含量，绕组温度等特征数据，再输入训练好的 BP 神经网络模型，可以做到对匝间短路，铁芯多点接地等故障的精确识别，诊断准确率可达到 90% 以上。但是该方法还是存在训练样本需求量大问题，特别是对于新型设备的故障诊断，由于历史样本不足导致模型的泛化能力下降，网络结构如隐藏层数量、神经元个数等的选择都是靠经验试错，没有统一的优化标准，增加了工程应用的难度。

（二）模糊逻辑故障诊断方法

模糊逻辑以模糊集合理论为基础，用模糊规则描述故障特征和故障间的不确定关系，适用于电力系统故障诊断中的模糊性、不确定性问题，它先将采集到的故障特征数据模糊化，转化为模糊集合，比如在断路器故障诊断时，把分闸时间、触头温度等特征参数转化为“短-中-长”“低-中-高”等模糊语言变量；再依据专家经验和历史故障数据制定模糊推理规则，比如“如果分闸时间长并且触头温度高，就认定是操动机构故障”，有些研究借助粗糙集理论对模糊规则执行约简，去掉多余规则，提升推理速度，最后用模糊推理引擎对模糊集合开展推理运算，得到故障诊断结果，再把这些结果解模糊化，变成具体的故障判断。在实际应用中，这种方法被用来对配电线路进行单相接地故障诊断，解决了由于故障信号微弱、干扰因素多而难以诊断的问题，但是模糊规则的制定仍然存在依靠专家经验的局限性，对于新型复合故障，容易因为规则的缺失而导致诊断失败；并且模糊化过程中隶属度函数的选择（三角形、梯形隶属度函数）也会影响诊断精度，需要根据具体的故障场景反复调试，增加了应用难度。

（三）基于支持向量机的故障诊断方法

支持向量机属于统计学习理论，它利用最优分类超平面来完成故障数据的分类及诊断，在电力系统故障诊断过程中，支持向量机把故障特征数据映射至高维特征空间，在高维空间里构建出最优分类超平面，使得各类故障数据间的分类间隔达到最大值，进而改善诊断的泛化性能，在小样本状况下依然具有不错的诊断效果，有效地克服了传统机器学习方法所遭遇的“维数灾难”以及“过拟合”难题，比如在新能源场站逆变器故障诊断当中，由

于逆变器故障样本稀少，采用支持向量机凭借少数样本就能做到对 IGBT 开路、短路等故障的正确分类，诊断精确度比传统神经网络要好。在实际使用中，核函数的选择直接关系到诊断效果的好坏，对于输电线路的故障诊断，由于存在很多非线性的故障特征，所以使用径向基核函数应用最多，分类准确率也比线性核函数要高 10%–15%；而对于变压器的局部放电故障诊断，多项式核函数更适用于处理多维度的放电特征数据。但是支持向量机在处理大规模故障数据时，例如全网范围内的线路故障诊断，需要计算所有样本和支持向量的距离，计算复杂度增加，诊断耗时变长，难以实现实时诊断；同时惩罚因子的选取也需要进行交叉验证，过程繁琐，也不利于工程的快速落地。

（四）深度学习故障诊断方法

深度学习属于人工智能领域的分支，借助构建多层神经网络结构来完成对数据深层特征的提取与学习，在电力系统故障诊断当中，被采用的深度学习方法包含卷积神经网络（CNN），循环神经网络（RNN），长短期记忆网络（LSTM）等等，卷积神经网络通过卷积层和池化层的交替运作，能够自动提炼出故障数据的空间特征，在电力设备红外热成像故障诊断环节，用 CNN 去提取设备热像图里的温度异常区域特性，从而达成对变压器套管老化，电缆接头过热之类的故障判定，诊断精确度可达到 95% 以上，而且不需要人工提取特征；循环神经网络及其改良版长短期记忆网络，可以很好地解决时序故障数据的问题，在风电并网线路故障诊断方面，LSTM 凭借分析故障电流，电压的时序变化规律，可以精准辨别出由于风速波动所引发的间歇性故障，防止传统办法出现误判情况。实际应用中，深度学习模型训练需要大

量的高质量标注数据，为了解决样本不足的问题，数据增强技术（如故障数据翻转、加噪、插值）被广泛使用，可以将样本数量扩大 3–5 倍，极大地提高了模型的泛化能力。但是深度学习模型的结构比较复杂，比如深层 CNN 要建立 10 层以上的网络结构，训练过程需要高性能的 GPU，计算成本高；同时模型存在“黑箱”问题，诊断结果难以解释，比如不能清楚地解释模型为什么判断某个故障是“绕组短路”，不利于运维人员理解故障原因，在关键电力设备诊断中不能完全代替人工。

四、结束语

综上所述，本文就依托人工智能技术的电力系统故障诊断方法展开研究，整理出传统故障诊断方法存在的缺陷以及人工智能技术应用的情况，从符合现代电网的发展趋势，助力行业发展技术创新，提高电力系统的安全韧劲，助力能源转型四个方面论述研究的重要意义，对人工神经网络，模糊逻辑，支持向量机，深度学习这四类主流 AI 诊断方法的原理，实践应用状况和现存缺陷做了细致的剖析研究，得出结论认为，人工智能技术能够冲破传统诊断技术遇到的障碍，大幅改良故障诊断的准确性以及适用场景，不过依然存在依靠样本，计算花费高，模型易被理解的问题。未来研究要重点攻克样本生成技术来应对数据短缺问题，推动模型轻量化设计以符合实时诊断需求，加大可解释性研究力度来提高工程应用可信度，而且要加强 AI 诊断方法同电力物联网、边缘计算的融合应用，从而做到电力系统故障的实时精确诊断并开展主动预警，给智能电网的安全稳定运行赋予更多技术支撑。

参考文献

- [1] 林向阳. 人工智能引领未来：大语言模型在电力系统中的创新应用 [J]. 新一代信息技术, 2023, 6(24): 29–34.
- [2] 武海天. 考虑噪声抗扰特性的配电系统可测试性设计研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(24): 78–80+83.
- [3] 高伟男. 纤维光学传感器在电力工程中的故障检测与远程监控 [J]. 数字技术与应用, 2023, 41(12): 25–27.
- [4] 侯博宇. 配网自动化技术在电力系统中的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (11): 213–215.
- [5] 何富浩, 陈诗伦. 基于电磁时间反转的电网故障定位方法 [J]. 电气应用, 2023, 42(11): 90–98.
- [6] 姜泽苗, 袁喆. 基于机器学习算法的电力系统故障诊断 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 366–368+371.
- [7] 夏飞. 自动化技术在配电系统管理中的应用 [J]. 电子技术, 2023, 52(11): 306–307.
- [8] 王思习. 基于频谱分析仪的电力系统故障检测与诊断 [J]. 数字通信世界, 2023, (11): 91–93.
- [9] 靳金. 10kV 配网调度中馈线自动化系统控制技术探讨 [J]. 数字通信世界, 2023, (11): 106–108.
- [10] 谭金龙, 熊小伏, 陈军, 等. 基于改进孪生支持向量机的新型电力系统继电保护故障诊断模型 [J]. 沈阳工业大学学报, 2023, 45(06): 631–636.