

智能电网环境下输配电系统的故障诊断与预测技术研究

陈晖

内蒙古孚岚商贸有限公司，内蒙古自治区呼和浩特市，010000；

摘要：面向泛在感知与自适应控制的电力系统运行环境，输配电侧承载拓扑复杂、设备异构与运行不确定并存的特征。故障呈现跨尺度传播与状态瞬变耦合，传统基于单一信号与静态规则的判别方法难以满足时效与准确需求。为提升可解释性与可迁移性，构建以机理约束为骨架的数据驱动框架，围绕故障机理表征、信息获取治理、诊断推理到预测维护的闭环展开，给出模型抽象方法、关键算法与评价指标体系的系统讨论，提出面向运行场景的轻量化实现路径与工程化接口，期望在安全阈值内实现快速定位、失效预警与风险抑制的协同目标。文中以一致性与可验证为主线，凝练可复用的模型单元与流程规范，面向分层架构给出部署要点与评估路径。

关键词：智能电网；输配电；故障诊断；故障预测；健康管理

DOI：10.69979/3060-8767.25.05.076

引言

智能电网通过通信与计算能力嵌入电能流动过程，输配电系统由此呈现高度连通与时变耦合。设备状态与网络拓扑的联动导致故障表现多样，电压暂降、谐波畸变、绝缘劣化与热应力相互影响。面对复杂性，工程实践需要一个兼顾机理与数据的综合方法，以保证诊断与预测在不同负荷水平与调度策略下保持稳健。本文从机理建模、信息融合与决策闭环三个层面展开，提出可复用的建模单元与推理范式，强调对观测不完备与标签稀缺的容忍，并给出面向部署的约束条件与实现要点。传统方法依赖规则与门限，面对多源数据与耦合机理时稳定性不足。新一代方法将约束写入可学习结构，既继承物理一致，又获得统计效率。实现路径需要考虑现场算力、通信时延与安全分区，在分层架构中安排边缘计算与中心推理的职责边界，使算法与流程相互匹配。为便于复用，本文给出通用组件的接口约定与评估要点，支持在不同区域内快速迁移与迭代。

1 故障机理与模型表征

1.1 输配电系统故障的能量流与拓扑特征

输配电网络的物理约束决定了故障的能量迁移路径与电磁耦合强度。沿线路与变压器的阻抗分布构成功率潮流分配的基础，节点注入与支路约束共同决定电压与电流的空间分布。当出现短路、断线或接触不良，局部参数突变破坏原有潮流平衡，导致邻域电压跌落与电流涌动，进而触发保护动作与振荡^[1]。理解这一过程需

要将网络视为带约束的图结构，节点状态与边参数共同描述能量流的可达性与阻尼。通过在状态方程中嵌入开关逻辑，可以抽象出拓扑变化对等值阻抗与节点灵敏度的影响，从而刻画故障传播的起点、通道与衰减规律。为连接模型与算法，可将节点注入与支路电流写成稀疏雅可比矩阵，灵敏度条目对应物理通道的放大或衰减。对不同故障模式事先计算基准灵敏度图谱，在线阶段以滑动窗口聚合短期量测，计算与图谱的相似度并给出候选集合。候选集合经由拓扑可达性筛选与保护动作一致性筛查后，只保留与实际连锁路径一致的解释。该流程避免对全网做代价高昂的全局反演，使定位在毫秒级告警洪流中保持及时。

1.2 多物理耦合下的故障演化机理与可观测性

输配电设备的失效常由电热机械化学等多物理因素协同驱动。导体温升改变电阻，绝缘老化降低介电强度，机械振动影响接触稳定，环境湿度改变泄漏通道，因素间的反馈使演化呈现非线性。为捕捉耦合关系，可将设备描述为由健康参数与激励变量构成的状态空间，演化在连通约束与能量平衡下推进。对变压器与电缆可引入等效热网络与极化模型，将不可测的老化态映射为可测的温度响应与介损变化，借助一组满足单调性的指示量建立衰退路径的有序刻画，从而为早期征兆的提取提供标尺。可观测性决定诊断的上限^[2]。由于传感配置受成本与可靠性约束，若仅依赖单点量测，许多内部状态不可区分。通过联合拓扑、设备额定与运行边界，可以构建覆盖率度量，评估在给定采样精度与时延下哪些

故障模式可被区分。该度量可指导传感位置优化与同步相量的必要数量。进一步地,利用冗余关系替代直接观测,诸如节点电压差与支路电流比值等组合量,在噪声下更具稳健。基于这些原则,形成从可观测性分析到传感部署的闭环,使后续诊断算法在信息足迹受限的条件下仍能稳定工作。耦合建模还应关注参数不确定。健康参数的真实值随时间漂移,若直接固定,会将未建模效应误判为异常。可采用区间或多胞形描述参数,诊断时在可行域内寻找最坏情形的解释,并以此给出保守的告警等级。对于长期趋势,可引入慢变量,使健康参数缓慢演进并受激励强度调制,既避免剧烈震荡,又能反映累积损伤。这样建立的演化链条与观测方程相互约束,可在稀疏观测下维持对内部状态的稳定跟踪。

2 诊断技术体系

2.1 信息获取与数据治理的统一框架

诊断质量取决于数据的可用性与一致性。输配电场景的数据来源包括智能电表、故障录波、同步相量、变电站监控与巡视文本等。采集环节存在采样率差异、时间戳漂移与缺失,治理环节需要在可信边界内完成校正与补全。可建立以事件为中心的数据模型,用事件标识串联不同源的记录,并以物理约束作为一致性检验。校正策略可采用双阶段流程,先在时域对齐触发片段,再在相量域匹配相位参考,避免跨域插值引发的偏差^[3]。补全策略可在约束可行域内求解最小改动解,使重构后的数据同时满足潮流平衡与设备容量边界。在高噪声与低样本的条件下,直接训练复杂模型容易过拟合。可在数据进入模型前注入结构化先验,将算子与约束写入网络,借助可微分的物理层实现守恒与边界的软硬混合约束。同时设置异常证据链,要求每一次告警均可追溯到具体约束的破坏与量测的偏离,从而提升可解释性。数据治理还需关注隐私与安全,采用分区隔离与最小必要传输策略,确保分层部署时各站点仅共享必要统计量。在这样的治理框架上,诊断模型具备可迁移与可扩展特性,能够在新投运区域快速适配。数据质量度量是治理闭环的重要环节。可构建覆盖完整、时间一致与物理一致三项指标,对每条记录给出分数,并以阈值驱动再采集与人工复核。在边缘侧部署轻量化预处理,将去噪、对齐与事件切片前移,减少中心系统的延时压力。对文本与运维记录可通过术语表与模板对齐提取关键字段,与量测时间线融合,形成对同一事件的多角度描述。这

样的数据底座为后续的融合推理与在线学习提供稳定输入。

2.2 多源信息融合与确定性可证的诊断推理

多源信息融合的目标是用一致的状态表示整合相量、拓扑、保护动作与告警日志。可采用图结构作为统一载体,节点表示设备与测点,边表示电气连接与信息依赖,属性包含量测值与不确定度。推理过程以约束满足为核心,将故障模式定义为破坏特定约束的最小集合,并通过代价函数平衡数据拟合与模型稀疏。求解可采用松弛与割平面的组合,使搜索在可解释的子空间内进行。该思路可自然支持多标签情形,对并发故障与连锁反应保持鲁棒^[4]。为了保证工程可用,需要确定性可证的性能下界。可通过一组可验证的不等式给出可分区间,即当噪声不超过某个界限时,定位误差与漏检率受限于显式函数。这一界来自灵敏度矩阵的奇异值与约束冗余度,能够在部署前提供参数选择依据。在线阶段可依据实时置信度控制报修与复原动作的节奏,避免过度跳闸与误判累积。配合基于证据的停机阈值,诊断系统在复杂告警洪流中保持稳定输出,满足对安全与可用的双重要求。在模型结构上,可选用因果图来表达触发关系与抑制关系,使推理能够主动提出反事实问题并验证备选解释。当告警之间存在时间偏置时,引入时序偏好与延迟核,保障推理不被先后次序的偶然性误导。为应对规模扩展,可将图分解为区域子图,先在区域内定位,再在区域边界进行一致化协调,最终形成全网一致的判定。该分解既顺应电网层级结构,也便于并行计算与增量维护。证据管理是诊断可信的基础。每一次定位都伴随可追溯的证据包,包含触发量测、被破坏的约束、候选模式与排除理由,并以可读的结构化摘要呈现,便于交叉核验与事后分析。该机制提升了人与系统的协作效率,使复杂结论获得操作人员的信任。

3 预测与运维协同

3.1 基于状态估计的剩余寿命预测框架

剩余寿命预测的关键在于以简驭繁。对输配电设备可采用分层状态估计,将可测量的外部状态与不可测的健康参数放入同一框架。外层利用广域信息进行静态与动态状态估计,内层以退化模型驱动健康参数更新,两者通过一致性惩罚耦合。这样可以在观测稀疏时利用网络约束弥补信息缺口,在观测充足时自动强化个体设备

特征。退化路径可由单调先验与缓变假设限定,使预测不随短期扰动大幅摆动。预测不应止步于曲线外推。对每一次健康评估需要输出可用寿命区间与触发条件,并将区间与运行策略关联。通过将环境温度、负荷波动与开断频度纳入激励描述,可生成对情景的条件预测,给出在不同调度目标下的寿命消耗速率。为了实现部署层面的可用,可采用增量更新与滑动窗口,使模型在设备更换与负荷季节性变化时保持稳定。结合置信度调整检修周期与备品配置,使预测结果真正转化为运维资源的优化分配。模型误差管理直接影响预测可用。可通过置信带与误差分解呈现不确定来源,将传感噪声、模型近似与外部激励分开评估,并对不同来源采取不同的缓释策略。对传感噪声采用鲁棒滤波与异常抑制,对模型近似采用多模型集成与门控更新,对外部激励采用情景库与蒙特卡洛评估。输出不只是一组数值,而是一组与场景绑定的策略建议,便于运维与调度协同使用。为了面向资产全生命周期管理,可将预测结果与台账关联,形成设备族的健康画像。通过对同型设备的群体行为进行对比,可发现异常个体与共性规律,并据此安排差异化策略。对长期运行的骨干设备配置更密集的观测与更谨慎的阈值,对新设备采用较宽松的边界以积累先验。这样的分层策略平衡了成本与风险。在实现层面,可定义统一的健康因子编码,与台账和工单状态同步更新,形成跨系统的状态源。为减少误触发,引入滞回阈值与驻留时间约束,只有在连续窗口内一致超限才进入预警。对异构设备,利用共形预测输出置信区间,使告警等级随置信度自动调节,既不放过早期征兆,也避免频繁波动对生产造成干扰。

3.2 从预测到决策的闭环优化方法

面向系统层的风险控制,需要把故障概率、影响范围与恢复代价统一到一个优化目标。可构造以供电可靠性与安全裕度为核心的效用,约束包含功率平衡、潮流极限与检修资源。预测模型提供各设备的故障概率与寿命区间,优化模块基于这些估计安排带电巡检、负荷转移与有序检修,形成面向风险的计划。为避免计划与现实脱节,引入回溯机制与滚动时域,将每一次实际观测折算为状态校正,并在下一轮优化中更新权重。闭环落地还依赖组织与流程。需要明确告警升级的触发条件与信息流转路径,确保从现场到调度的反馈不被延迟。对

不同层级的用户提供差异化可视化,运维侧关注设备与工单,调度侧关注潮流与安全边界,管理侧关注成本与服务水平。通过标准化的接口将诊断与预测模块嵌入现有系统,配合保护定值与自动化装置的参数协调,形成协同运行的新基线。在此基础上,系统能够在大扰动与异常负荷下保持可控,逐步积累可信数据,推动方法与规程的持续改进。为了让闭环具备学习能力,在滚动执行中记录策略与结果的配对样本,周期性地校正预测模块与代价模型,使系统逐步接近真实运行机理。针对突发事件,可设置紧急模式的权重切换,将安全裕度的权重快速提升,并允许临时放宽部分经济性指标。通过事后复盘将临时策略沉淀为规则库的一部分,下一次同类情形即可快速复用。由此形成从观测到行动再到改进的常态化循环。跨部门协同依赖标准化的指标与协议。故障概率、安全裕度与停电代价等指标需要统一口径与计算方法,并在系统间以规范的消息格式传递,减少理解偏差。通过制度化演练与定期评估,检查闭环在极端情景下的稳定性与恢复速度,形成可持续改进的组织能力。

4 结语

智能电网中的输配电系统需要兼顾物理规律与数据方法的协同。围绕故障机理、数据治理、融合推理与寿命预测,可以形成由约束驱动的诊断与预测一体化框架。该框架以可解释的模型单元为核心,以可验证的性能界为护栏,以工程接口为载体,支持在多场景下稳定运行。面向未来,传感覆盖与计算资源将持续提升,但复杂性同样增加。以机理为底、以数据为翼的路径能够在安全边界内实现快速定位与稳健预警,并将预测收益转化为切实的运维改进,进而提升供电可靠与系统韧性。

参考文献

- [1] 卢晨,杨亚三,辛美青. 智能电网下输配电技术的发展趋势与应用前景分析[J]. 智能城市, 2025, 11 (04): 66-68. DOI: 10. 19301/ j. cnki. znccs. 2025. 04. 018.
- [2] 高文颖. 智能电网中的输配电设备状态监测及故障预警研究[J]. 光源与照明, 2024, (06): 96-98.
- [3] 刘金亭,陈杰. 智能电网在输配电及用电工程中的应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024, (11): 126-128.
- [4] 吴舒俐. 基于 PLC 的电力输配电线路故障排除技术研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (04): 105-107.