

基于数字孪生的电力通信网络故障诊断与自愈机制研究

王 璞 赵艳朋

内蒙古电力(集团)有限责任公司乌海供电分公司 内蒙古 乌海 016000

摘要: 电力通信网络是电网核心基础设施,其故障特性复杂。本文聚焦基于数字孪生的故障诊断与自愈机制研究。先分析电力通信网络故障特性,接着阐述数字孪生体构建目标、层级架构、关键技术与实施路径。随后设计故障诊断机制,包括诊断目标流程、孪生感知与特征提取、智能诊断模型。还设计了故障自愈机制,涵盖自愈目标分级、孪生驱动决策、自愈执行与闭环控制,为电力通信网络运维提供新思路。

关键词: 数字孪生; 电力通信网络; 故障诊断; 自愈机制

引言: 电力通信网络作为电网调度自动化、继电保护及安稳控制等核心业务的承载基石,其运行可靠性直接关系到大电网的安全稳定。随着网络规模持续扩大、业务类型日益复杂,传统运维模式在故障感知实时性、诊断精准度及恢复效率方面逐渐显现局限性,难以应对故障的隐蔽性与连锁传播风险。本文旨在探索数字孪生在电力通信网络故障治理中的应用机制,为提升网络韧性、保障电网可靠运行提供理论支撑与实践参考。

1 电力通信网络故障特性分析

电力通信网络是支撑电网调度等业务的核心设施,故障特性复杂多维。从诱因看,分内生性与外生性故障,内生性源于设备老化、软件漏洞等自身因素,如光模块衰减致信号中断,故障间隔时间随设备年限指数增长;外生性受自然灾害、人为误操作等外部环境影响,极端天气下故障发生率比正常高3-5倍。从传播特性看,有“局部故障全局蔓延”特点,单一节点故障可能引发连锁反应,如变电站通信节点故障致调度指令传输延迟。从影响程度分致命性、严重和一般故障,骨干网核心节点瘫痪会直接中断电网调度。此外,故障还有隐蔽性,部分软故障如链路误码率升高,初期无明显告警却会恶化业务质量。深入分析这些特性是精准诊断与自愈故障的前提^[1]。

2 电力通信网络数字孪生体构建

2.1 构建目标

电力通信网络数字孪生体构建核心目标是实现物理与虚拟孪生体的全要素映射、实时同步及闭环交互,为网络故障治理、运维优化提供数字化支撑。具体要达成四点:一是精准复现物理实体,1:1虚拟建模网络拓扑等核心要素,使孪生体与物理网络在结构、性能和行为上高度一致;二是建立实时数据交互通道,实现物理网络运行数据与孪生体毫秒级同步,涵盖设备运行等关键

数据,为故障感知提供实时数据源;三是具备模拟仿真与预测能力,模拟不同故障场景下网络响应,预测故障发展趋势及影响范围,为故障诊断与自愈决策提供提前量;四是构建全生命周期管理能力,实现网络全流程数字化管控,通过历史数据优化网络设计与运维策略,提升整体可靠性,最终构建数字化运维体系。

2.2 数字孪生体层级架构

电力通信网络数字孪生体采用“物理层-数据层-模型层-应用层”四级架构,各层级协同。物理层是基础,涵盖电力通信网络所有物理实体,如核心路由器等,通过部署传感器等全面感知设备状态与环境参数。数据层负责数据汇聚与处理,由采集、预处理等模块组成,借助5G等技术实时采集物理层数据,经处理后存入数据库,通过API接口与模型层交互。模型层是核心,包含几何、物理、行为及规则模型,分别实现网络拓扑等精准建模、模拟设备特性、刻画运行状态、集成运维经验。应用层面向业务需求,构建故障诊断等模块,调用模型层与数据层能力,提供可视化监控等服务,各层级通过标准化协议双向传输数据指令,确保架构开放可扩展。

2.3 关键构建技术与实施路径

电力通信网络数字孪生体构建的关键技术涵盖多领域核心技术,建模技术方面采用BIM与GIS融合技术实现网络拓扑与地理信息的精准关联,结合多体动力学仿真技术构建设备物理模型,通过数字线程技术确保模型全生命周期的一致性;数据采集技术依托5G+边缘计算实现海量数据的实时采集,采用物联网技术实现设备全参数感知,结合区块链技术保障数据传输的安全性与不可篡改性;仿真技术运用离散事件仿真与连续系统仿真相结合的方法,构建多场景仿真引擎,实现故障演化与网络响应的精准模拟;智能分析技术集成机器学习、深度学习算法,通过历史数据训练故障识别与预测模型^[2]。实

施路径遵循“分步实施、迭代优化”原则，第一步开展需求分析与规划，明确网络关键节点与业务场景，制定建模范围与数据采集清单；第二步完成数据采集与基础建模，部署采集终端，构建网络几何模型与基础数据平台；第三步进行模型迭代与功能开发，完善物理模型与行为模型，开发数据同步与仿真模块；第四步开展应用集成与试点运行，在某区域电网试点部署故障诊断等应用，验证孪生体性能；第五步进行全网络推广与持续优化，基于试点经验优化模型与应用，实现全网络孪生体覆盖，通过持续迭代提升孪生体与物理网络的契合度。

3 基于数字孪生的故障诊断机制设计

3.1 诊断目标与流程

基于数字孪生的电力通信网络故障诊断机制，核心目标是实现故障的“精准定位、快速识别、原因分析、影响评估”四位一体诊断，相较于传统诊断方式，将故障诊断时间缩短50%以上，诊断准确率提升至95%以上。诊断流程采用“孪生感知-特征匹配-仿真验证-结果输出”的闭环流程，首先通过数字孪生体的实时同步能力，感知物理网络的设备运行参数、链路流量、告警信息等数据，实现故障的初步感知；其次将采集的故障数据输入特征提取模块，提取故障的关键特征指标，如链路误码率、设备CPU利用率、告警类型等，与孪生体模型中的故障特征库进行匹配，初步判断故障类型与位置；然后通过孪生体构建故障仿真场景，模拟故障发生过程，验证初步诊断结果的准确性，分析故障产生的根本原因，同时仿真故障对周边设备及业务的影响范围；最后输出完整的诊断报告，包括故障位置、类型、原因、影响范围及建议处理方案，同步将诊断结果反馈至孪生体模型，更新故障特征库，为后续诊断提供数据支撑，整个流程通过数据与模型的协同实现故障诊断的精准高效。

3.2 故障孪生感知与特征提取

故障孪生感知依托数字孪生体的“物理-虚拟”同步机制，构建全维度感知体系，突破传统感知的局限性。感知层面采用“端-边-云”协同感知模式，终端层通过部署在设备上的智能传感器采集电压、电流、温度等运行参数，边缘层通过边缘节点实时采集链路流量、时延、丢包率等业务数据，云端实现全局告警信息与运维数据的汇聚，通过孪生体的数据同步通道实现三类数据的融合感知，确保故障信号无遗漏。针对隐蔽性故障，采用主动感知与被动感知相结合的方式，主动向孪生体发送测试信号模拟业务传输，监测传输质量，被动捕捉物理网络的异常波动，实现故障的早期发现。特征提取环节

采用“传统算法+智能算法”的融合方案，传统算法如小波变换用于提取故障的时域与频域特征，如故障发生时的信号突变特征；智能算法如卷积神经网络（CNN）用于提取高维抽象特征，通过训练CNN模型自动识别故障与正常状态的特征差异^[3]。同时构建动态特征库，结合孪生体积累的历史故障数据，实时更新特征指标权重，针对不同设备类型（如传输设备、交换设备）定制差异化特征提取规则，确保提取的特征具有针对性与有效性，为后续诊断模型提供高质量输入。

3.3 融合数字孪生的智能诊断模型

融合数字孪生的智能诊断模型采用“规则推理+机器学习+仿真验证”的混合智能架构，充分发挥各模块的协同优势。规则推理模块作为基础层，集成电力通信网络的运维经验与故障处理规则，如“光模块收光功率低于-28dBm时判定为光链路故障”等明确规则，实现常见故障的快速诊断，提高诊断效率。机器学习模块是核心诊断单元，采用基于孪生数据的迁移学习算法，解决传统模型训练数据不足的问题，通过孪生体生成大量模拟故障数据，结合物理网络的真实故障数据训练深度学习模型（如LSTM、Transformer），模型输入为故障特征提取结果，输出为故障类型、位置及置信度，同时通过孪生体实时数据在线更新模型参数，提升模型自适应能力。仿真验证模块作为诊断校准单元，针对机器学习模块输出的诊断结果，在孪生体中构建相同工况的仿真场景，模拟故障发生与演化过程，验证诊断结果的准确性，若仿真结果与诊断结果偏差超过阈值，则触发模型重新推理，直至诊断结果与仿真结果一致。通过三者的有机融合，实现故障诊断的精准性与可靠性，同时降低对人工经验的依赖。

4 基于数字孪生的故障自愈机制设计

4.1 自愈目标与分级策略

基于数字孪生的电力通信网络故障自愈机制，核心目标是实现故障的“自动识别、快速响应、精准恢复、最小影响”，针对不同等级故障制定差异化自愈策略，将故障恢复时间缩短至分钟级，核心业务中断时间控制在30秒以内，最大限度降低故障对电网业务的影响。自愈分级策略基于故障影响范围、严重程度及业务优先级划分为三级：一级自愈针对轻微故障，如单个接入层设备端口故障，影响范围仅为局部非核心业务，采用本地自愈策略，通过孪生体自动调用备用端口完成切换，无需人工干预；二级自愈针对中度故障，如区域汇聚层链路中断，影响多个变电站的监控业务，采用区域协同自愈策略，由区域孪生节点统筹规划，通过调整路由、启

用备用链路实现业务恢复,同时向运维人员发送告警通知;三级自愈针对严重故障,如核心骨干节点瘫痪,影响全网调度业务,采用全局联动自愈策略,由主孪生体启动应急方案,调用多区域备用资源重构网络拓扑,同时触发人工运维团队介入,确保核心业务优先恢复。分级策略通过孪生体实时评估故障等级,动态匹配自愈方案,实现资源高效利用与故障快速恢复的平衡。

4.2 孪生驱动自愈决策机制

孪生驱动的自愈决策机制以数字孪生体为核心,构建“数据感知-态势评估-方案生成-仿真验证”的全流程决策体系。数据感知阶段通过孪生体实时同步物理网络的故障数据、设备状态、业务流量等信息,构建故障态势数据矩阵,为决策提供实时依据;态势评估阶段采用层次分析法(AHP)结合模糊综合评价法,从故障影响范围、业务优先级、设备负载率等维度对故障态势进行量化评估,确定故障等级与自愈紧急程度,如核心业务链路故障的评估权重高于普通业务链路。方案生成阶段基于规则库与智能算法双重驱动,规则库存储历史自愈经验与标准处理流程,智能算法采用遗传算法与强化学习相结合的方式,针对故障场景优化自愈方案,如优化路由路径、分配备用资源等,生成多个候选方案;仿真验证阶段在孪生体中搭建与物理网络一致的仿真环境,对候选方案进行模拟执行,评估方案的恢复时间、资源消耗、业务影响等指标,选择最优方案输出至执行层。

4.3 自愈执行与孪生闭环控制

自愈执行与孪生闭环控制是确保自愈机制有效落地的关键环节,形成“决策-执行-反馈-优化”的闭环管理流程。自愈执行阶段采用“远程控制+本地执行”协同模式,主孪生体将最优自愈方案解析为具体控制指令,通过远程控制接口下发至物理网络的智能执行单元,如通

过SNMP协议控制路由器调整路由配置,通过智能PDU控制设备电源重启,同时本地执行单元实时反馈指令执行状态。反馈阶段通过孪生体实时采集执行后的物理网络数据,包括故障恢复状态、设备运行参数、业务传输质量等,与自愈目标进行对比分析,评估自愈效果,如故障是否完全恢复、业务时延是否回归正常范围等^[4]。若自愈效果未达预期,如业务恢复后仍存在丢包现象,则触发闭环优化流程,返回至决策阶段重新生成方案,通过孪生体调整仿真参数进行二次验证后再次执行。同时将自愈过程中的数据、方案及效果记录至孪生体的知识库,更新自愈规则库与智能算法模型,优化后续自愈决策与执行效率。通过闭环控制实现自愈机制的持续迭代优化,提升网络的自我修复能力与可靠性。

结束语

文章围绕基于数字孪生的电力通信网络故障诊断与自愈机制展开研究,构建了数字孪生体,设计了故障诊断与自愈机制。通过精准诊断故障、分级自愈策略、闭环控制等,可提升网络可靠性与运维效率。未来,随着技术发展,数字孪生在电力通信领域的应用将更深入,有望进一步优化网络性能,保障电网安全稳定运行,为电力行业数字化转型提供有力支撑。

参考文献

- [1]张羽鹏,李子龙.电力信息通信网络中故障定位与恢复策略研究[N].广东科技报,2025-01-17(014).
- [2]梁敬鑫.人工智能下的电站通信网络故障诊断与优化方法研究[J].信息与电脑(理论版),2024,36(12):182-184.
- [3]林栩蕾.水电厂通信网络故障诊断与恢复机制研究[J].数字通信世界,2025,(01):37-39.
- [4]张晋蓉.列车通信网络故障诊断仿真模型分析[J].黑龙江科学,2024,15(18):91-93+97.