

电力信息物理系统故障通信恢复策略

吴江

国家能源集团陕西电力有限公司郭家湾电厂 陕西 榆林 719400

摘要: 本文针对电力信息物理系统 (CPPS) 故障通信恢复问题展开研究。分析了CPPS故障特性, 包括故障类型、成因、传播机制及对通信系统的影响。探讨了故障检测与定位技术, 提出通信路径重建与优化方法, 并针对信息物理交互复杂性、网络攻击防御、不确定性因素影响等关键技术挑战给出应对策略, 旨在提高CPPS故障通信恢复能力, 保障电力系统稳定运行。

关键词: 电力信息物理系统; 故障通信恢复; 故障检测与定位; 通信路径重建与优化

引言: 电力信息物理系统 (Cyber-Physical Power Systems, CPPS) 作为智能电网的核心组成部分, 其稳定运行对保障电力供应安全至关重要。然而, CPPS面临着设备故障、自然灾害、网络攻击等多重风险, 一旦发生故障, 通信系统的中断将严重阻碍故障定位、隔离与恢复, 导致停电范围扩大、恢复时间延长。因此, 研究高效的故障通信恢复策略成为保障电力系统可靠性的关键课题。

1 电力信息物理系统故障特性分析

1.1 故障类型与成因

电力信息物理系统 (Cyber-Physical Power Systems, CPPS) 中的故障类型多种多样, 其中设备故障是最为常见的一种。这类故障往往由设备老化或设计缺陷引起, 随着时间推移, 设备性能逐渐下降, 最终导致功能失效。自然灾害也是引发故障的重要因素之一, 强风、洪水等极端天气条件可能对电力设施造成严重损害, 影响系统的正常运行。网络安全威胁日益增加, 网络攻击也成为CPPS面临的一大风险因素。通过恶意软件或直接攻击关键控制系统, 攻击者可以干扰甚至瘫痪整个电力系统。各类故障的成因复杂多样, 除了上述提到的因素外, 环境因素如湿度、温度变化也会加速设备老化, 增加故障发生率。人为错误在操作维护过程中难以完全避免, 无论是误操作还是维护不当都可能导致意外停机。恶意攻击则利用系统漏洞进行针对性破坏, 对电力系统的安全构成重大威胁。这些成因不仅增加了故障发生的可能性, 也使得故障预防和处理变得更加困难。

1.2 故障传播机制

CPPS中物理层和网络层的相互依赖关系使得故障传播机制更加复杂。一旦某个子系统出现故障, 若未能及时隔离, 故障可能会迅速扩散至其他相关联的系统, 形成连锁反应^[1]。例如, 电网中的某段线路故障可能引起局

部过载, 进而触发保护装置动作, 切断更多线路, 扩大停电范围。这种连锁故障的发生机制通常涉及一系列复杂的交互作用, 从初始故障点开始, 逐步蔓延直至达到稳定状态或得到控制。连锁故障的发生机制主要依赖于CPPS内部各组件间的紧密联系。一个组件的故障可以迅速波及到与其相连的其他组件, 尤其是当这些组件跨越了物理层和网络层时, 其影响更为显著。随着故障的扩散, 整个系统的稳定性受到挑战, 可能出现更大范围的服务中断。了解连锁故障的演化过程对于制定有效的应急响应策略至关重要, 有助于快速定位问题源头, 采取措施限制故障扩散, 保障系统尽快恢复正常运行。

1.3 故障对通信系统的影响

故障对通信系统的影响极为深远且复杂。当通信系统遭遇故障时, 其网络拓扑结构会受到显著影响, 部分节点的失效或链路的突然中断会导致网络结构发生改变。这种改变并非简单的物理连接问题, 而是会引发一系列连锁反应, 使得原本规划好的数据传输路径需要重新进行规划与调整。在数据传输过程中, 通信链路的质量会遭受严重冲击。信噪比的下降使得信号在传输过程中更容易受到干扰, 而延迟的增加则直接影响了实时数据传输的可靠性与准确性。对于需要高精度、高实时性通信的电力系统而言, 这种影响尤为致命。通信设备性能的受损同样不容忽视, 一旦设备出现故障, 数据丢失的风险将陡然增加。在电力系统中, 这种状况可能导致调度指令无法及时下达与执行, 进而延误故障的定位和修复工作, 使得停电时间延长, 给用户带来极大的不便, 同时也增加了恢复供电的成本。因此, 提升通信系统的鲁棒性和自愈能力, 优化通信协议以及改进故障检测技术, 成为了保障电力系统稳定运行的关键所在。

2 故障检测与定位技术

2.1 故障检测方法

在电力系统中，故障检测技术的发展对于提高系统的可靠性和安全性至关重要。基于继电保护装置、故障指示器和智能传感器等设备的故障检测技术是当前应用较为广泛的方法之一。继电保护装置通过监测电力系统中的电流、电压等参数变化来识别异常情况，并迅速做出响应以隔离故障区域，防止故障扩大。这种技术具有快速响应、高可靠性等特点，但对环境干扰较为敏感。故障指示器则主要用于配电网中，能够直观显示故障发生位置，便于维护人员快速定位问题。智能传感器的应用进一步增强了电力系统的感知能力，它们可以实时监控多种运行状态参数，为后续分析提供丰富的数据支持^[2]。除了传统硬件设备外，利用数据挖掘、机器学习等先进方法对电力系统运行数据进行分析也成为故障检测的重要手段。通过对历史运行数据的学习，这些方法能够识别出潜在的故障模式，实现故障的早期预警。例如，某些算法可以根据负荷变化趋势预测可能发生的过载现象；另一些则能从复杂的运行数据中提取特征，用于识别不同类型的故障。这种方法的优势在于能够处理大量复杂信息，提供更加精准的故障预警和诊断结果。

2.2 故障定位算法

故障定位是确保电力系统稳定运行的关键环节，有效的故障定位算法可以帮助快速准确地确定故障点，减少停电时间和维修成本。基于图论的故障定位算法利用电力网络的拓扑结构信息，通过构建数学模型来模拟故障传播过程，进而推断出最有可能的故障位置。这类方法在理论上有很好的解析解，但在实际应用中可能会受到网络复杂度的影响。优化算法也是解决故障定位问题的有效途径之一。通过建立目标函数并使用优化技术寻找最优解，可以在满足特定约束条件下找到最佳故障位置估计。此方法适用于处理多故障点情况，但计算复杂度较高，需要耗费较多时间进行求解。人工智能技术如神经网络、模糊逻辑等近年来也被应用于故障定位领域。借助强大的学习能力和自适应性，这些技术能够在没有精确数学模型的情况下仍能有效工作，尤其适合应对非线性、不确定性问题。不同故障定位算法各有特点，适用场景也有所不同。基于图论的方法更适合结构清晰、规模较小的网络；优化算法适用于需要考虑多种因素影响下的故障定位；而人工智能方法则在处理复杂、不确定性强的环境下表现出色。选择合适的故障定位算法应综合考虑系统特性、故障类型及现有资源条件等因素。随着技术的进步，未来故障检测与定位技术将继续向着更高效、更智能的方向发展。

3 通信路径重建与优化

3.1 通信路径重建方法

在电力信息物理系统（CPPS）中，通信路径的稳定性和可靠性对于系统的正常运行至关重要。一旦发生故障，如何快速有效地重建通信路径成为关键。基于图论最大流理论和增广路径算法等技术的通信路径重建方法，是解决这一问题的有效手段之一。这类方法首先通过构建网络模型来模拟通信网络的拓扑结构，利用最大流理论计算出网络的最大传输能力，并识别出瓶颈环节。增广路径算法则在此基础上寻找能够增加网络流量的路径，即增广路径，通过不断优化路径选择来提升整体网络性能。选择具有大容量、低延时、少故障链路的通信路径进行优先重建，可以有效保障通信质量。这不仅要求对现有网络资源有深入理解，还需考虑未来可能的需求变化^[3]。针对电力侧状态感知需求与运行调控能力保障的通信路径重建策略尤为重要。电力系统的运行需要实时监控和快速响应，任何通信中断都可能导致严重的后果。在重建过程中，需特别关注那些对电力系统运行至关重要的节点和链路，确保其通信路径的高可用性和冗余度。例如，对于关键变电站或发电厂的通信连接，应采用多重备份路径设计，以防止单点故障导致的服务中断。

3.2 通信路径优化技术

为了进一步提高通信资源的利用效率和通信质量，研究基于网络流理论、博弈论、优化算法等的通信路径优化技术显得尤为必要。网络流理论提供了一套数学工具，用于分析和优化网络中的数据流动情况。通过对网络流的建模和分析，可以发现潜在的瓶颈位置，并采取措加以改进。这种方法适用于大规模复杂网络环境，有助于提升整体网络性能。博弈论作为一种决策分析工具，也被引入到通信路径优化领域。通过模拟不同参与者之间的互动过程，可以找到最优的资源共享和分配方案。在多用户共享同一通信网络的情况下，博弈论可以帮助平衡各方利益，避免资源竞争带来的效率低下问题。优化算法如遗传算法、粒子群优化等，因其强大的搜索能力和灵活性，被广泛应用于通信路径优化中。这些算法能够在庞大的解空间中寻找近似最优解，适应于处理复杂的非线性问题。不同优化技术对通信路径性能的影响和适用条件各有特点。网络流理论更适合于需要精确控制和预测的数据流管理场景；博弈论则在处理多方利益冲突时显示出独特优势；而优化算法由于其通用性强，几乎可以应用于所有类型的优化问题。选择合适的优化技术需根据具体应用场景和需求来定。例如，在需要快速响应的紧急情况下，可能会倾向于使用计算速

度更快的方法；而在追求长期效益最大化的情形下，则可能更看重算法的全局寻优能力。

4 关键技术挑战与应对策略

4.1 信息物理交互复杂性

在信息物理生产系统（CPPS）中，信息物理交互的复杂性成为故障通信恢复的一大挑战。信息物理交互过程涉及物理设备与信息系统的深度融合，二者之间存在紧密的耦合关系。这种耦合关系导致一旦某个环节出现问题，可能会迅速波及整个系统，引发连锁反应。信息物理耦合故障的识别与处理尤为困难。物理设备状态的变化会实时反映到信息系统中，而信息系统的指令也直接控制着物理设备的运行。当出现故障时，故障信号可能在信息与物理两个层面同时出现，且表现形式多样，难以准确判断故障根源。例如，物理设备可能因机械磨损出现性能下降，同时信息系统可能因软件漏洞产生错误指令，二者相互影响，使得故障诊断变得复杂。为应对信息物理交互的复杂性，建立信息物理耦合模型是关键举措之一。通过构建精确的耦合模型，能够清晰地描述信息与物理系统之间的相互作用关系，为故障诊断和恢复提供理论依据。加强信息物理协同控制也不可或缺，通过优化控制策略，使信息与物理系统在运行过程中保持高度协调，降低故障发生的概率，并在故障发生时能够快速实现系统恢复。

4.2 网络攻击防御

网络攻击对CPPS通信系统构成了严重威胁。随着信息技术的广泛应用，CPPS的通信网络成为网络攻击的重要目标。虚假数据注入攻击是一种常见的攻击手段，攻击者通过向通信系统中注入虚假数据，干扰系统正常运行，导致决策失误^[4]。拒绝服务攻击则通过大量无效请求占用系统资源，使合法用户无法正常访问系统，造成系统瘫痪。针对网络攻击，需采取一系列有效的防御策略。加密技术是保障通信安全的基础，通过对传输的数据进行加密处理，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。防火墙作为网络安全的第一道防线，能够阻止外部非法访问，过滤恶意流量。入侵检测系统可实时监测网

络活动，及时发现异常行为并发出警报，为安全管理人员提供决策支持。虚假数据检测修正方法则专注于识别和纠正通信系统中的虚假数据，确保系统接收到的信息真实可靠。

4.3 不确定性因素影响

自然灾害、设备故障等不确定性因素对CPPS故障通信恢复产生着不可忽视的影响。自然灾害如地震、洪水等可能导致通信基础设施严重损坏，中断通信链路，使系统无法正常通信。设备故障则可能由设备老化、制造缺陷等原因引起，一旦发生，会影响设备的正常运行，进而影响整个系统的通信性能。为应对不确定性因素，建立风险评估模型是重要措施。通过对可能发生的不确定性因素进行全面评估，确定其发生概率和影响程度，为制定应对策略提供依据。制定应急预案能够在不确定性因素发生时，迅速采取有效措施，降低损失。提高系统的鲁棒性和自愈能力也是关键，通过优化系统设计，增强系统对不确定性的抵抗能力，使系统在遭受干扰后能够快速恢复正常运行，保障通信的连续性和稳定性。

结束语

电力信息物理系统故障通信恢复是保障电力系统安全稳定运行的重要环节。通过深入研究故障特性、检测与定位技术、通信路径重建与优化方法以及关键技术挑战与应对策略，可以为CPPS故障通信恢复提供有力的理论支持和实践指导。未来，随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，CPPS故障通信恢复策略将不断完善和优化，为电力系统的可靠运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]郭佳强.基于人工智能的电力系统故障诊断与恢复策略研究[J].中华纸业,2024,45(2):86-88.
- [2]刘志刚,陈晓峰.智能电网中故障定位技术的研究进展[J].电力系统自动化,2023,47(5):1-8.
- [3]孙伟,李明轩.基于多代理系统的电力系统自动恢复策略[J].电网技术,2024,48(2):123-130.
- [4]高翔,王丽娜.大数据分析在电力系统故障诊断中的应用研究[J].中国电机工程学报,2025,49(3):234-241.