DOI：10.13334/j.0258-8013.pcsee.230837 文章编号：0258-8013 (2024) 23-9122-12 中图分类号：TM 73 文献标识码：A

基于潮流转移相似性的连锁故障高危环节辨识

李妍莎，蔡晔*，曹一家，李政洋，施星宇

(长沙理工大学电气与信息工程学院，湖南省 长沙市 410076)

High-risk Links Identification for Cascading Failures Based on the Power Flow Transfer Similarity

LI Yansha, CAI Ye*, CAO Yijia, LI Zhengyang, SHI Xingyu

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Identifying the origins and primary propagation pathways of cascading failures is crucial for preventing the rapid development of cascading failures in the cyber physical power system (CPPS). The coupling between information and physics increases the probability of cross-domain fault propagation and amplifies the risks of fault consequences, but the large-scale transfer of unbalanced power flows remains the inherent driving force behind cascading failures. This paper proposes a high-risk links identification method for cascading failures based on power flow transfer similarity. First, a fault propagation model for the CPPS is constructed to simulate the power flow redistribution and optimization scheduling in the cascading failures. Then, it is revealed that there is a similarity in power flow transfer from faults triggered to cascading fault propagation and system restoration, and direct and indirect power flow transfer similarity calculation methods are proposed to quantify the risk of triggering cascading failures from source faults and the dangerous consequences of power flow transfer from secondary faults, thus achieving comprehensive identification of high-risk segments in cascading failures. Finally, the IEEE 118-bus CPPS and a provincial CPPS are taken as examples for simulation analysis. The simulation results demonstrate that the proposed method can accurately identify high-risk segments in the origin and development process of cascading failures. In the source fault stage, high-risk combinations of faults are more likely to induce cascading failures and lead to major blackouts. In the secondary fault stage, protecting high-risk transmission lines can effectively reduce the scale and losses of cascading failures.

KEY WORDS: cascading failures; power flow transfer similarity; risk identification; cyber physical power system

摘要：辨识连锁故障的起源和核心传播路径是阻断和预警电力信息物理系统(cyber physical power system，CPPS)连锁故障快速发展的关键。信息物理的耦合使得故障跨域传播的概率和故障危害放大的风险增加，但潮流大规模不均衡的转移仍是连锁故障快速发展的内在驱动力。该文提出一种基于潮流转移相似性的连锁故障高危环节识别方法。首先，构建CPPS 的故障跨域传播模型模拟连锁故障中的潮流重分配与优化调度过程；其次，揭示从故障源发到级联跨域传播，直至系统解列过程中普遍存在潮流转移相似性，提出直接和间接潮流转移相似性的概念及计算方法；由此量化源发故障触发连锁跳闸的风险以及继发故障的潮流转移的危险后果，进而全面辨识连锁故障中高危环节；最后，以 IEEE 118 节点 CPPS 和中国某省实际 CPPS 为例仿真验证。仿真结果表明，所提方法能够有效识别连锁故障起源和发展中的高危环节。在源发故障阶段，高危组合故障更容易诱发连锁故障并导致大停电事故。在继发故障阶段，保护高危输电线路可有效地降低连锁故障的规模和事故损失。

关键词：连锁故障；潮流转移相似性；风险识别；电力信息物理系统

0 引言

现代电力系统逐渐发展为高度耦合的电力信息物理系统。信息-物理系统的融合有助于电力设备之间的协调运行，但信息物理耦合带来了更多运行跳闸。2019 年英国大停电[1]、阿根廷大停电[2]以及 2015 年乌克兰大停电[3]等近年来诸多大停电事故表明，连锁故障是大停电事故的主要原因之一[4]。分析连锁故障过程，辨识故障起源与传播过程中的

基金项目：国家自然科学基金项目(52277076)；国家自然科学基金项目联合基金(U1966207)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52277076); Project Supported by National Natural Science Joint Foundation of China (U1966207).

高危环节，对确保 CPPS 的安全可靠有着重要意义。

辨识连锁故障的起源和核心传播路径是阻断连锁故障快速发展的关键。历史事故记录表明，连锁故障可分为源发故障、继发故障和快速雪崩 3 个阶段[5]。其中，源发故障和继发故障阶段的持续时间长于快速雪崩阶段，在故障发展的这两个阶段对高危环节施加诸如后备保护跳闸闭锁[6]、负荷重分配[7]等抑制措施，能减轻连锁故障的事故后果。然而，信息物理的深度耦合、电网互联规模的不断增加以及攻击策略的发展升级[8]，造成了 CPPS 运行不确定性的增加与故障模式的层出不穷。因此，基于枚举法或还原法的传统安全分析方法[9]难以穷尽所有的故障场景。文献[10]基于网页排名算法 PageRank 算法筛选关键线路，但方法局限于源发故障阶段 N–1 的潮流转移的相关性分析，未能挖掘连锁故障传播过程中元件之间的相互影响；文献[11-12]分别基于频繁项挖掘算法 Apriori、FP-growth 算法提取继发故障阶段连锁故障路径的共同特征，但这类基于统计算法的研究模式本质是筛选出一些发生概率相对较高的事件，侧重于连锁故障路径中元件的相关性挖掘，而对不在同一故障路径中元件的相关性考虑不足。

连锁故障的本质是潮流大规模不均衡的转移导致的故障相继响应过程。系统潮流分布是否均匀是电力系统进入自组织临界态的关键判别标准[13]。当输电潮流分布的高度不均匀时，电力系统即使平均负载率较低也能进入自组织临界态[14]。此时很小的控制参数变化或扰动都可能引发临界相变，表现为连锁故障[15]。

电力信息物理系统的耦合交互加剧了连锁故障的传播广度和深度，但潮流的转移依旧是连锁故障快速发展的内在驱动力。信息层的故障导致电网潮流分布状况不能得到完全的改善，电网灾变应急能力下降，低重要性的元件故障也可能导致严重的潮流转移[8]。信息系统发出的切机、切负荷等调度命令最终也是作用在电力系统的异常潮流平抑上，欠调和过调等失败的优化控制加速了潮流大规模不均衡转移，进而推动连锁故障跨域传播[16]。当前对潮流转移的分析多集中在对电力系统热稳定边界的辨识[17-18]。鲜有研究通过归纳大停电事故中的潮流转移特征辨识 CPPS 连锁故障中的高危环节。

自相似性是现代电力系统的重要特征[19]。文献[20]建立了递阶电力系统的结构模型，发现主系统和子系统之间具有明显的结构自相似性特征。通信设备通过电源线依存于电力站点，信息系统的结构与电力系统高度相似。文献[21]基于分形理论对电力系统负荷进行研究，结果表明，相同空间状态或相同时间尺度下的电力负荷分布也是自相似的。拓扑结构和物理功能的自相似性特征势必会导致系统内部故障造成的潮流转移影响区域[22]存在重叠，即潮流转移相似性。由于连锁故障中元件的次序故障是潮流定向转移的后果[23]，连锁故障路径的重复性和相似性可视作潮流转移相似性的间接表达。

潮流转移相似性现象在故障源发和级联跨域传播中都普遍存在[24]。文献[8,25]研究表明，多重故障及其引发的潮流转移是 CPPS 在联合检修、组合攻击等场景中发生大停电的根本原因。而传播行为的相似性与连锁故障事故规模和传播范围存在关联。文献[26]对耦合系统拓扑结构的研究表明，子网络内部节点的相似性显著地改变了系统故障的临界密度，相似性增加时，系统的鲁棒性减弱。文献[27-28]对社交网络信息传播的研究表明，传播行为的相似性对传播范围的扩大起到了促进作用。网络规模增加时，相似性对级联传播的扩散推动作用更加显著。因此，有必要对连锁故障中的潮流转移相似性展开研究，明确故障传播过程中的风险放大机理，提取不同故障路径中潜在的故障模式，进而辨识连锁故障的起源和关键传播行为。

本文基于课题组已有的信息物理交互作用下的连锁故障模型基础[16]，提出基于潮流转移相似性的连锁故障高危环节辨识方法。通过分析连锁故障中普遍存在的潮流转移和重分配现象及大规模潮流转移造成的连续跳闸过程，提出直接和间接潮流转移相似性的概念及计算方法。在此基础上分别辨识触发和推动连锁故障传播、造成系统事故状态转换的高危环节。IEEE 118 节点标准 CPPS 和中国某省实际 CPPS 的算例分析验证了所提方法的有效性。与现有研究方法相比，所提方法能够更准确地把握造成大停电事故的关键故障环节，对辨识结果施加缓解措施能够有效地实现连锁故障阻断和大停电事故防控。

1　电力信息物理系统连锁故障传播机制

CPPS 中连锁故障是由于设备意外故障或受到恶意攻击导致的输电路径改变，造成其他输电线路相继过负荷跳闸而引起的。如图 1 所示，电力系统

中部分电力节点因为输电线路故障与主网失去连接形成孤岛，与之相依的信息节点失去可靠的电力供应而失效。信息网拓扑结构的连通性下降，针对电力网的监测与控制能力也受到限制。调度中心不能及时感知评估电网的运行状态，也不能及时地针对故障类型对电网进行优化调度。电力系统中大规模的潮流转移得不到有效的平抑，导致连锁故障蔓延。失效元件的范围在信息层和物理之间反复传递扩大，直至电网崩溃。

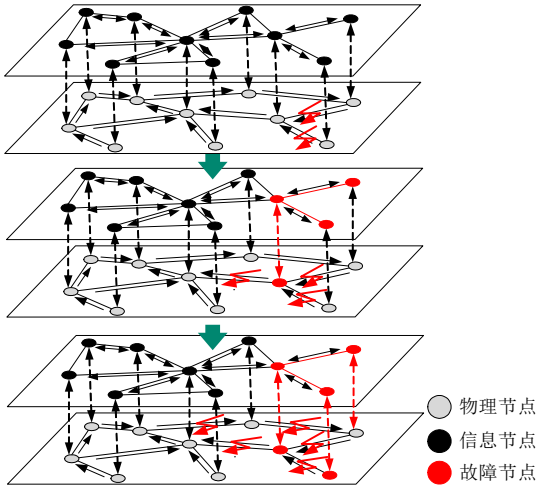


图 1 CPPS 连锁故障传播示意图

Fig. 1 Cascading failures in the CPPS

CPPS 连锁故障仿真流程如图 2 所示。

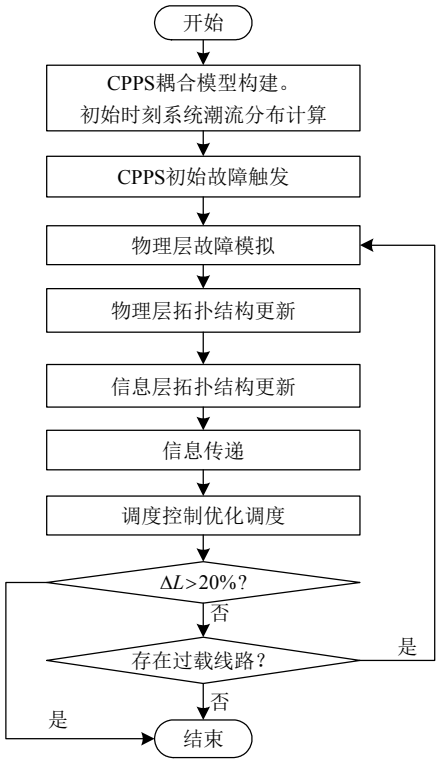


图 2 CPPS 连锁故障仿真流程

Fig. 2 Simulation flow chart of the cascading failures in the CPPS

具体仿真流程如下。

1）系统初始化：构建 CPPS 耦合系统网络拓扑模型。物理层的拓扑结构用 $G_p=\{V_p, E_p\}$表示。其中：V_p 表示电力节点集合；E_p 表示输电线路集合。信息层的拓扑结构用 $G_c=\{V_c, E_c\}$表示。其中：V_c 表示信息节点集合；E_c 表示通信链路集合。

2）初始故障触发：选择输电线路跳闸断开，模拟偶发故障。

3）物理层故障模拟计算：本文采用直流潮流算法计算耦合系统的潮流分布，直流潮流算法计算速度快、易收敛，在大型电力系统的潮流分布状况估计中得到广泛应用[29-30]。受潮流转移作用，正常运行的输电线路上承担的有功功率增加，输电线路过载，当功率超过热稳定运行极限时，保护装置动作，导致过载线路被切除。输电线路跳闸的概率与过载水平有关，如式(1)所示：

$$P(l_j)=\begin{cases}0, & P_j \le P_{j\_\max}^{\text{nor}} \\ \dfrac{P_j - P_{j\_\max}^{\text{nor}}}{P_{j\_\max}^{\text{emerg}} - P_{j\_\max}^{\text{nor}}}, & P_{j\_\max}^{\text{nor}} < P_j \le P_{j\_\max}^{\text{emerg}} \\ 1, & P_j \ge P_{j\_\max}^{\text{emerg}}\end{cases} \tag{1}$$

式中：l_j 为输电线路，$j=1, 2, \cdots, N$；N 为 CPPS 中的输电线路数目；$P(l_j)$为输电线路 l_j 的故障概率；P_j 为输电线路 l_j 的传输的有功功率；$P_{j\_\max}^{\text{nor}}$ 和 $P_{j\_\max}^{\text{emerg}}$ 分别为输电线路 l_j 正常运行状态和紧急运行状态下允许的最大有功功率。

4）物理层拓扑更新：根据式(1)求取被切除的故障输电线路，更新物理层拓扑。剔除故障输电线路后，物理层网络边集合为

$$E_p' = F(E_p - \mu_p) \tag{2}$$

式中：μ_p 为跳闸输电线路集合；E_p–μ_p 表示求取μ_p 在全集 E_p 中的补集；$F(\cdot)$表示求取连通边子集。

5）信息层拓扑更新：根据信息-物理节点的相依关系，更新信息层拓扑结构。电力节点故障后，相依的信息节点面临供电不足和电能质量差等问题[31]，通信设备的可靠性降低，此时相依信息节点会以概率 p 失效。剔除失效节点后，信息层网络节点集合 V_c' 可以表示为

$$V_c' = F(V_c - \mu_c) \tag{3}$$

式中：μ_c 为失效信息节点集合；$V_c - \mu_c$ 表示求取 μ_c 在全集 V_c 中的补集；$F(\cdot)$ 表示求取连通节点子集。

6）信息传递：信息层检测物理层的异常状态，输电线路过载或跳闸时，相依的信息节点产生故障

信息包。这些故障信息包以特定的路由策略[32]经过通信网络传输到调度中心。信息边的数据传输能力是有限的，当数据负荷超过一定限度时，边的数据处理能力会下降，通信链路传输失常的概率为

$$\lambda_{(i_c,j_c)}=c_{(i_c,j_c)}[v_{(i_c,j_c)}-v^0_{(i_c,j_c)}]/v^0_{(i_c,j_c)} \tag{4}$$

式中：$\lambda_{(i_c,j_c)}$为信息边$(i_c j_c)$的失效概率；$c_{(i_c,j_c)}$为等待处理的信息数据列队长度；$v_{(i_c,j_c)}$和$v^0_{(i_c,j_c)}$分别为信息边(i_c, j_c)的实际信息流量和参考信息流量。

7）调度中心优化控制：调度中心根据信息网传输的故障信息评估物理层的运行状态并做出优化调度决策，通过正常运行的信息节点向物理层发送调度命令，本文采用最优经济调度模型(optimal power flow，OPF)模拟这一过程：

$$\begin{cases}\min\limits_{P_g}\sum\limits_{i=1}^{n_g}C_{g,i}P_{g,i}\\ \boldsymbol{B}P_j+P_g-P_d=0\\ P_g^{\min}\le P_g\le P_g^{\max}\\ -P_{j\_\max}^{\text{nor}}\le P_j\le P_{j\_\max}^{\text{nor}}\end{cases} \tag{5}$$

式中：n_g表示发电机的数目；$C_{g,i}$表示发电机 i 的发电成本系数；$P_{g,i}$表示发电机 i 的实际输出的有功功率；$\boldsymbol{B}$ 表示电力系统的导纳矩阵；P_d 表示负荷的需求有功功率；P_g、$P_g^{\max}$、$P_g^{\min}$ 分别表示发电机的有功功率输出、最大限制有功功率出力、最小限制有功功率出力。OPF 模型考虑了功率平衡及线路传输约束、发电机约束，以最小运行花费为目标，对物理系统的发电机出力和负荷进行调整。

连锁故障终止判定：负荷损失是连锁故障的直接后果，本文选取负荷损失率ΔL 评估连锁故障对电力系统的危害程度。ΔL 的计算如式(6)所示。以负荷损失率及系统中是否仍存在过载线路作为连锁故障终止的判定依据。若不再生成新的过载线路或者大停电事故发生，系统崩溃时(ΔL 超过系统总负荷的 20%[33])，认为连锁故障停止。

$$\Delta L=1-\Big(\sum_{i\in G_p}P_{g,i}\Big)/\Big(\sum_{i\in G_p'}P_{g,i}\Big) \tag{6}$$

式中：ΔL 为系统负荷损失；$P_{g,i}$为发电机 i 实际输出的有功功率；G_p 为故障发生前的电力网络拓扑图；G_p' 为故障发生后网络拓扑中最大连通图。

2　连锁故障中的潮流转移相似性分析

电力信息物理系统连锁故障是由初始扰动引发的一系列输电线路跳闸和信息设备失效继发响应直至大停电的过程。在信息物理系统复杂的交互作用下，CPPS 连锁故障的发展过程具有不确定性和多样性。但连锁故障发展过程中仍表现出一定的相似特征，归纳挖掘这些相似特征有助于明确连锁故障放大机理，进而实现连锁故障高危环节辨识。

2.1　故障输电线路的潮流转移特性

CPPS 的系统安全裕度在源发故障阶段因少量元件的故障失效而降低，直至某个特定的事件触发全系统的连锁反应，CPPS 进入继发故障阶段。潮流转移是这一时期系统运行状态变化的主要特征。正常运行状态下，电力网络的节点电压方程为

$$\boldsymbol{I}_0=\boldsymbol{Y}_0\cdot\boldsymbol{U}_0 \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{I}_0$ 和 $\boldsymbol{U}_0$ 为故障前节点的注入电流和电压；$\boldsymbol{Y}_0$为节点导纳矩阵。

通过定量的改变节点注入电流增量，可以等效为故障线路未从电力网络中移除，以保持 $\boldsymbol{Y}_0$ 不变。此时电力网络的节点电压方程为

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}_1=\boldsymbol{Y}_0\cdot\boldsymbol{U}_1\\ \text{s.t.}\ \begin{cases}\boldsymbol{I}_1=\boldsymbol{I}_0+\Delta\boldsymbol{I}\\ \boldsymbol{U}_1=\boldsymbol{U}_0+\Delta\boldsymbol{U}\\ \Delta\boldsymbol{I}=\boldsymbol{Y}_0\cdot\Delta\boldsymbol{U}\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{I}_1$ 和 $\boldsymbol{U}_1$ 为故障后节点的注入电流和电压；$\Delta\boldsymbol{I}$ 和$\Delta\boldsymbol{U}$ 为节点的注入电流增量和电压增量。

输电线路 l_i=(i_m, i_n)故障跳闸后，等效的节点注入电流增量为

$$\begin{cases}\Delta\boldsymbol{I}=\boldsymbol{M}_i\cdot I_i\\ \text{s.t.}\ \begin{cases}\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}=[0\ \cdots\ \underset{i_m}{1}\ 0\ \cdots\ \underset{i_n}{-1}\ 0\ \cdots\ 0]\\ I_i=\dfrac{1}{\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_0^{-1}\boldsymbol{M}_iR_i}\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}_0=-\gamma_i\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}_0\end{cases}\end{cases} \tag{9}$$

式中：R_i为输电线路 l_i的电阻；$\boldsymbol{M}_i$用以指示故障线路 l_i两端的电力节点。

因此，输电线路 l_i=(i_m, i_n)故障跳闸后，输电线路 l_j=(j_m, j_n)的电流增量ΔI_j以及有功潮流增量ΔP_j分别为

$$\begin{cases}\Delta I_j=\dfrac{\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{U}}{R_j}=-\eta_jI_i\\ \text{s.t.}\ \ \eta_j=\dfrac{\gamma_j\boldsymbol{M}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_0^{-1}\boldsymbol{M}_iR_i}{R_j}\end{cases} \tag{10}$$

$$\Delta P_j=\Delta I_i(u_{j_m}+\Delta u_{j_m})\approx-\eta_jI_iu_{j_m} \tag{11}$$

式中 u_{j_m} 为节点 j_m 的电压。

潮流转移的本质是将故障输电线路传输的有功功率重新分配到电力系统的剩余输电线路中，潮流转移相关的输电线路支路传输的有功功率增加。如式(12)所示，若输电线路的有功功率超过其热稳定极限允许值，将引起后备保护动作跳闸。在电力信息物理交互作用下，故障将快速跨域、跨区传播。

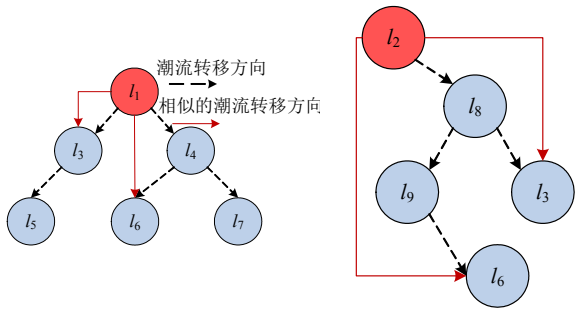
$$P_j = P_j^0 + \sum \Delta P_j > P_{j\_\max}^{\text{emergy}} \tag{12}$$

式中 P_j^0 为输电线路 l_j 传输的初始功率。

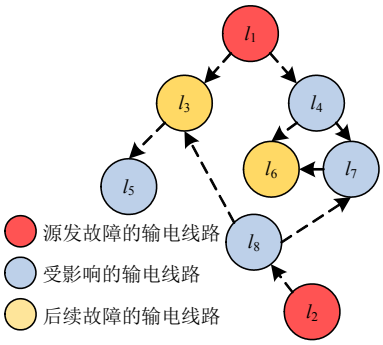
2.2 潮流转移相似性分析

1）源发故障阶段的直接潮流转移相似性。

以图 3 为例简单介绍源发故障的潮流转移相似现象及其与继发故障的关系。



(a) l_1 单独故障触发的潮流转移过程 (b) l_2 单独故障触发的潮流转移过程



(c) l_1 和 l_2 组合故障触发的潮流转移过程

图 3 源发故障引发的潮流转移过程

Fig. 3 Power flow transfer caused by the initial failures

图 3(a)、(b)分别描述输电线路 l_1 和 l_2 单独故障时的潮流转移情况。输电线路故障切除后，潮流转移到剩余的输电线路。输电线路 l_3 至 l_8 有功功率增加，但仍低于热稳定极限的允许值，此时没有出现继发故障。

图 3(c)是同时切除 l_1 和 l_2 后的潮流转移过程，图 3(c)中出现了继发故障。这是因为输电线路 l_1 和 l_2 的故障都会造成有功潮流向 l_3 和 l_6 转移，其组合故障后输电线路 l_3 和 l_6 上传输的有功功率增加且超过了其热稳定极限的允许值，导致输电线路 l_3 和 l_6 跳闸断开。

源发故障阶段的潮流转移相似性是组合故障诱发连锁跳闸反应的重要原因，定义为直接潮流转移相似性。基于图 3，源发故障阶段的潮流转移相似性可定义为：在系统初始运行状态下，对于任意输电线路 l_i 和 l_j，若输电线路独立故障引发的潮流转移区域出现重叠，该重叠现象定义为 l_i 和 l_j 间的直接潮流转移相似性。潮流转移区域的重叠度越高，潮流转移区域中有功功率转移量越大，表示输电线路 l_i 和 l_j 在源发故障阶段的直接潮流转移相似度越高。

输电线路 l_i 和 l_j 的直接潮流转移相似性 $s_d(l_i, l_j)$ 数学定义为

$$s_d(l_i,l_j)=\begin{cases}\sum_{m=1}^{|O(l_i)|}\sum_{n=1}^{|O(l_j)|} s_d[O_m(l_i),O_n(l_j)], & i\neq j\\ 1, & i=j\end{cases} \tag{13}$$

式中：$O(l_i)$和 $O(l_j)$分别为源发性故障阶段受 l_i 和 l_j 潮流转移影响的对象集合；$|O(l_i)|$和$|O(l_j)|$分别表示集合中的元素数量；$O_m(l_i)$和 $O_n(l_j)$分别表示集合中的第 m 和 n 条输电线路。

2）继发故障阶段的间接潮流转移相似性。

输电线路次序跳闸是继发故障阶段的主要特征事件。以连锁故障路径描述故障传播关系，连锁故障路径定义为具有时序关系的故障组合：

$$\text{Path} = < l_a \rightarrow l_b \rightarrow \cdots \rightarrow l_m \cdots \rightarrow l_n > \tag{14}$$

优化调度失败，异常潮流转移得不到有效平抑，持续不均衡的潮流转移造成输电线路过载跳闸，而输电线路的故障又将造成新的一轮潮流转移。因此，连锁故障路径的相似性是潮流转移相似的间接表达。以图 4 为例阐述间接潮流转移相似性。

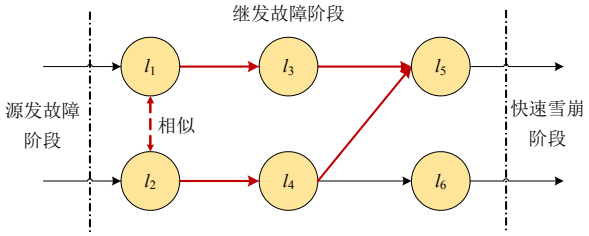


图 4 继发故障阶段连锁故障的间接潮流转移相似性

Fig. 4 Indirect power transfer similarity in the successive failure period

图 4 中存在 3 条连锁故障路径：Path 1=<l_1→l_3→l_5>，Path 2=<l_2→l_4→l_5>，Path 3=<l_2→l_4→l_6>。连锁故障路径中的故障环节存在相似性。如在 Path 1=<l_1→l_3→l_5>和 Path 2=<l_2→l_4→l_5>中，l_1 和 l_2 故障造成的潮流转移都导致了 l_5 故障。这意味着 l_1 故障引发的潮流转移后果与 l_2 故障造成的潮流转移后

果相似。故障路径的相似性定义为间接潮流转移相似性。

输电线路 l_i 和 l_j 的间接潮流转移相似性 $s_{id}(l_i, l_j)$ 数学定义如下：

$$s_{id}(l_i,l_j)=\begin{cases}\sum_{m=1}^{|F(l_i)|}\sum_{n=1}^{|F(l_j)|}s_{id}[F_m(l_i),F_n(l_j)], & i\neq j\\ 1, & i=j\end{cases} \tag{15}$$

式中：$F(l_i)$和 $F(l_j)$分别为继发故障阶段与 l_i 和 l_j 存在故障传播关系的输电线路集合；$|F(l_i)|$和$|F(l_j)|$分别表示集合中的元素数量；$F_m(l_i)$和 $F_n(l_j)$分别表示集合中的一条输电线路。

2.3　潮流转移相似性计算方法

由式(13)和(15)可知，相似性沿着潮流转移关系和故障传播关系全网传递。SimRank 算法[34]能根据相关关系计算网络中的各元素间的相似性。本文基于 SimRank 算法计算潮流转移相似性。算法的数学表达为

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}^{(m+1)}=c\cdot\dfrac{\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}^{(m)}\boldsymbol{R}}{\max s^{(m)}(l_i,l_j)}\vee\boldsymbol{E}\\ \text{s.t.}\begin{cases}\boldsymbol{R}=\{r(l_i,l_j)\}_{N\times N}\\ \boldsymbol{S}^{(m)}=\{s^{(m)}(l_i,l_j)\}_{N\times N}\\ 0\le s^{(m)}(l_i,l_j)\le 1\end{cases}\end{cases} \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{R}$ 为输电线路的直接或间接潮流转移相关性矩阵；$r(l_i, l_j)$为矩阵中输电线路直接或间接潮流转移相关性系数；$\boldsymbol{R}$ 和 $r(l_i, l_j)$的具体定义和计算方法见式(17)和(19)；$\boldsymbol{S}^{(m)}$为第 m 次迭代计算后的相似性矩阵；$s^{(m)}(l_i, l_j)$为第 m 次迭代计算后输电线路 l_i 和 l_j 间的相似性；$\boldsymbol{E}$ 为单位矩阵；操作符∨表示取左右矩阵中的较大值；c 为阻尼系数，一般取 c=0.8。

初始值 $\boldsymbol{S}^{(0)}=\boldsymbol{E}$，预设收敛值$\varepsilon=10^{-14}$，当$|\boldsymbol{S}^{(m+1)}-\boldsymbol{S}^{(m)}|<\varepsilon$时，算法停止。此时矩阵 $\boldsymbol{S}^{(m)}$为各故障输电线路的相似度计算结果。

3　基于相似性的连锁故障高危环节辨识

连锁故障高危环节包括源发故障阶段和继发故障阶段的高危环节辨识两部分内容。源发故障阶段的高危环节是能够触发连锁跳闸反应的组合故障，这是连锁故障的起源。继发故障阶段的高危环节是能够再次引发恶劣潮流转移后果的故障输电线路，这是连锁故障再次传播和快速扩散的重要动力。

3.1　源发故障阶段的高危环节辨识

输电线路相关关系分析是相似性计算的前提，根据直流潮流模型计算 CPPS 的有功功率潮流转移结果，以矩阵 $\boldsymbol{A}$ 描述输电线路的直接潮流转移相关关系，数学描述为

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}=\{a(l_i,l_j)\}_{N\times N}\\ \text{s.t.}\quad a(l_i,l_j)=\begin{cases}\dfrac{|P_j|-|P_j^0|}{|P_{j\_\max}^{\text{emergy}}|-|P_j^0|},|P_j|>|P_j^0|\\ 0,|P_j|<|P_j^0|\\ 0,i=j\end{cases}\end{cases} \tag{17}$$

式中 $a(l_i, l_j)$为输电线路 l_i 和 l_j 之间的直接潮流转移相关系数。

将潮流转移相关关系矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和相关系数 $a(l_i, l_j)$代入式(16)，即可求得输电线路的直接潮流转移相似结果。

对于包含 k 条输电线路的故障集合 F，其在源发故障时期的风险值 $R_T(F)$为

$$\begin{cases}R_T(F)=\dfrac{p_F}{k}\sum_{i,j\in F}\sum_{m\notin F}a(l_i,l_m)\cdot[1+s_d(l_i,l_j)]\\ \text{s.t.}\quad p_F=\prod_{i\in F}p_i\end{cases} \tag{18}$$

式中：p_F 和 p_i 分别为故障集合 F 和故障输电线路 l_i 在源发故障阶段被触发的概率；源发故障阶段的故障具有偶发性，输电线路因外界恶意攻击或运行方式变化而被切除。简化起见，所有输电线路在这一时期的故障概率相同；$\sum_{m\notin F}a(l_i,l_m)$ 为输电线路 l_i 故障后对故障集合 F 外的输电线路有功潮流影响之和；k 根据实际连锁故障防控需求确定。

式(18)的物理含义是：源发故障阶段，F 包含的输电线路直接潮流转移相似度越高，组合故障造成的潮流转移影响范围越大，则 F 触发继发故障的可能性越大。因此，根据式(18)计算 F 的风险值，$R_T(F)$越大，F 在同规模的故障组合中的风险排名也越高。排序靠前的故障组合 F 即高危的 k 阶源发性组合故障。

3.2　继发故障阶段的高危环节辨识

根据源发故障阶段的高危环节辨识结果，在第 1 节所构建的 CPPS 连锁故障模型中触发并模拟连锁故障传播，记录能触发大停电事故的连锁故障路径，构建高危连锁故障数据库 D。

以矩阵 $\boldsymbol{B}$ 描述输电间接潮流转移关系：

$$\begin{cases}\boldsymbol{B}=\{b(l_i,l_j)\}_{N\times N}\\ \text{s.t.}\quad b(l_i,l_j)=[f(l_i\to l_j)]/[f(l_i)]\end{cases} \tag{19}$$

式中：$b(l_i, l_j)$为输电线路 l_i 和 l_j 的间接潮流转移相关系数；$f(l_i)$、$f(l_i \to l_j)$分别表示故障输电线路 l_i 和故障传播关系 $l_i \to l_j$ 在连锁故障数据库 D 中的出现频率。

潮流转移的后果不仅表达在其所在的连锁故障路径中，也表达在与之间接潮流相似的输电线路所在的连锁故障路径中。通过挖掘连锁故障数据中的共同特征，评估输电线路 l_i 在故障传播这一阶段带来的后果风险，如式(20)所示：

$$R_P(l_i) = N[f(l_i)] + N[\sum s_{id}(i,j) \cdot f(l_j)] \quad (20)$$

式中：$f(l_i)$和$f(l_j)$分别表示故障输电线路 l_i、l_j 在 D 中的出现频率；$N[\cdot]$为归一化函数。

式(20)考虑继发故障阶段的潮流转移相似性，通过评估由 l_i 引发的潮流转移在大停电数据库中的出现频率，量化了 l_i 带来的故障传播风险。根据式(20)计算 $R_P(l_i)$并排序，排序靠前的输电线路即继发故障的高危故障环节。

3.3 连锁故障高危环节的辨识流程

综上，连锁故障起源和传播阶段的高危环节辨识均包含 3 个步骤：1）输电线路相关关系分析；2）直接/间接潮流转移相似性计算；3）故障环节的风险值量化和排序。基于相似性的连锁故障高危环节辨识流程如图 5 所示。

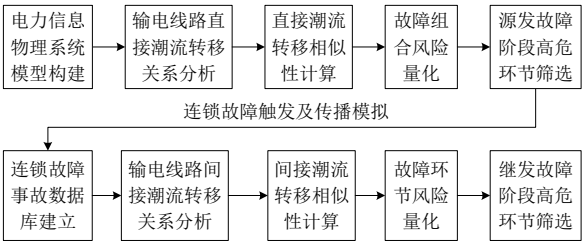


图 5 基于相似性的电力信息物理系统连锁故障高危环节的辨识流程

Fig. 5 High-risk links identification of cascading failures in CPPS based on similarity flow chart

4 算例分析

论文以 IEEE 118 节点 CPPS 和中国某省实际 CPPS 为例分析验证。以负荷损失 ΔL 作为大停电事故发生的判别标准，取信息节点失效概率 $p = 0.1$。取信息网络的边最大介数中心度作为对应信息边参考信息流量。

IEEE 118 节点 CPPS 的物理层包含 118 个电力节点以及 187 条输电线路。共计负荷量 4 242 MW。信息层用 118 节点的无标度网络模拟，信息节点和物理节点以“度-度”方式相依。

中国某省 220 kV 及以上电压等级电网中共包含 324 个电力节点及 553 条输电线路，共计负荷量 17 844 MW。该省的信息网络拓扑结构及信息-物理对应关系根据实际连接关系、能量供应关系构建。

4.1 源发故障阶段的高危环节辨识

根据第 3 节所述方法辨识源发阶段的高危环节。以 k=2 为例，118 节点 CPPS 中共有 $C_{187}^2 = 17\,391$ 种故障组合，某省实际 CPPS 共有 $C_{553}^2 = 152\,628$ 种故障组合。基于所提方法辨识这一时期最高危的前 10 组源发性组合故障，并在对应的 CPPS 中模拟这些源发性组合故障后被触发后的连锁故障过程，统计负荷损失ΔL，结果如表 1 所示。

表 1 CPPS 源发故障阶段的高危环节

Table 1 High-risk links in the primary failure period of the power CPPS

序号	118 节点 CPPS		中国某省实际 CPPS	
	高危环节	ΔL	高危环节	ΔL
1	(100, 106)，(100, 103)	36.2%	(31, 28)，(31, 32)	43.2%
2	(51, 52)，(69, 70)	41.8%	(222, 158)，(32, 29)	43.2%
3	(49, 66)，(56, 59)	61.7%	(31, 32)，(31, 28)	21.8%
4	(8, 9)，(9, 10)	35.2%	(23, 182)，(33, 16)	22.3%
5	(60, 61)，(63, 64)	28.7%	(3, 19)，(19, 16)	36.9%
6	(64, 65)，(63, 59)	20.5%	(32, 29)，(161, 221)	14.8%
7	(49, 54)，(69, 75)	10.2%	(179, 10)，(3, 19)	25.1%
8	(49, 50)，(68, 69)	58.4%	(8, 13)，(1, 13)	36.4%
9	(55, 59)，(50, 57)	10.0%	(16, 107)，(19, 16)	33.6%
10	(103, 110)，(110, 111)	12.0%	(27, 10)，(24, 14)	24.3%

表 1 表明，基于所提方法辨识的源发性组合故障被触发后，负荷损失ΔL>10%。所提方法有效地从规模庞大的输电线路故障组合中辨识出了能够引发大停电的源发性故障组合。

注意到表 1 中存在一部分高危源发性故障组合，组合中的输电线路不存在拓扑直接连接关系，如 IEEE 118 节点 CPPS 的输电线路(49, 66)和(56, 59)，中国某省实际 CPPS 中的输电线路(55, 59)和(19, 34)等。但这类输电线路组合具有相似的潮流转移关系。其组合故障时，通过诱发潮流转移关系影响 CPPS 的安全运行。

基于式(7)—(10)，计算 IEEE 118 节点 CPPS 中输电线路(49, 66)和(56, 59)的潮流转移影响区域，如图 6 所示，相似潮流转移区域上转移的有功功率结果如表 2 所示。结果可见，(49, 66)和(56, 59)故障后，都会影响(55, 59)、(19, 34)等输电线路上传输的有功功率。虽然单条故障不会导致过载跳闸，但在组合故障中，上述线路很可能会因同时承受来自(49, 66)

和(56, 59)传递的有功潮流而导致有功功率超过其热稳定极限的允许值，将引起后备保护动作跳闸。这凸显了潮流转移相似性分析的必要性。

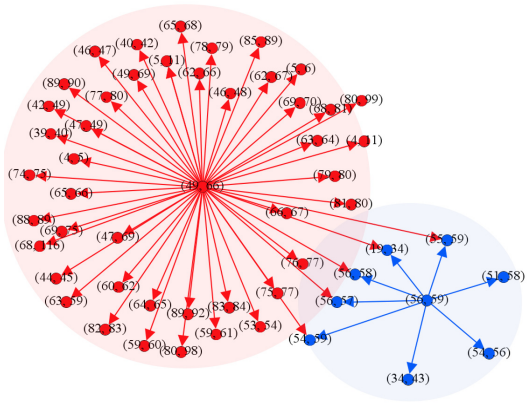


图 6　输电线路(49, 66)和(56, 59)的潮流转移影响区域

Fig. 6　Power flow transfer effect extents of transmission lines (49, 66) and (56, 59)

表 2　输电线路(49, 66)和(56, 59)的相似潮流转移区域

Table 2　Similar power flow transfer effect extents of transmission lines (49, 66) and (56, 59)

序号	输电线路	(49, 66)故障时转移的有功功率/MW	(56, 59)故障时转移的有功功率/MW
1	(55, 59)	18.2	18.5
2	(19, 34)	0.1	0.1
3	(56, 58)	0.2	0.1
4	(56, 57)	14.5	13.4
5	(54, 59)	16.8	16.5

为验证所提方法在标准 CPPS 和实际 CPPS 中辨识源发故障阶段高危环节的有效性，分别以 IEEE 118 节点 CPPS 和中国某省实际 CPPS 为对象，在下列 3 类场景中触发连锁故障以对比分析。

场景 1：基于直接潮流转移相似性辨识源发性故障组合，并在 CPPS 中触发；

场景 2：随机选择两条输电线路作为源发性故障组合，并在 CPPS 中触发；

场景 3：随机选择两条输电线路作为源发性故障组合，并在单一电力系统中触发。

统计各类场景连锁故障仿真的电力负荷损失，结果如图 7 所示。

图 7 结果表明，无论是在平均负荷损失还是在大停电事故(ΔL 超过系统总负荷的 20%)比例上，基于潮流转移相似性辨识的源发性故障组合所造成的事故后果都更严重。

在平均负荷损失方面，IEEE 118 节点 CPPS 在场景 1 中的平均负荷损失为 1 425.4 MW。而在场景 2、3 中分别为 1 139.3 和 1 126.3 MW。中国某省实际 CPPS 在场景 1 中的平均负荷损失为 4 147.9 MW。而在场景 2、场景 3 中分别为 2 915.7 和 2 287.1 MW。

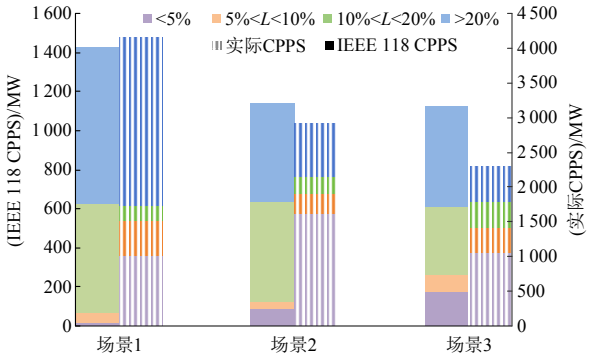


图 7　3 类场景触发故障时电力负荷损失统计结果

Fig. 7　Statics of the power system's load loss with faults triggered in 3 settings

在大停电事故比例方面，IEEE 118 节点 CPPS 在场景 1 中$\Delta L \geq 20\%$的事故占总事故的 56.12%，而在场景 2、场景 3 中分别为 45.79%和 44.03%。中国某省实际 CPPS 在场景 1 中$\Delta L \geq 20\%$的事故占总事故的 58.16%，而在场景 2、3 中分别为 26.05%和 22.00%。

进一步检验所提方法对高阶源发故障的适用性。以 IEEE 118 节点 CPPS 为对象，分别对前述 3 类故障触发场景在 k=3 和 k=4 时的连锁故障过程仿真模拟，统计电力负荷损失，结果如图 8 所示。

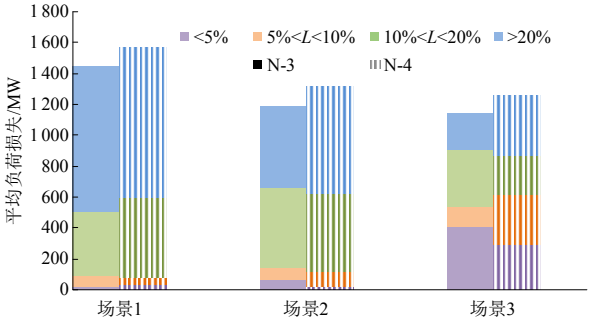


图 8　3 类场景触发高阶故障时电力负荷损失统计结果

Fig. 8　Statics of the power system's load loss with faults triggered in 3 settings

图 8 可见，对于 k=3 及 k=4 的高阶源发故障情境，场景 1 中触发的故障组合所造成的平均电力负荷损失和大停电事故比例都高于场景 2 和 3，与 k=2 时的仿真结论一致。所提方法对于高阶源发性故障仍具有较好的适用性，基于直接潮流转移相似性能有效地筛选出这类故障情境中高危的故障组合。

4.2　继发故障阶段的高危环节辨识

基于第 3 节所提方法辨识继发故障阶段的高危环节，并与文献[35]所提的连锁故障高危环节辨识结果相比较。对于 IEEE 118 节点 CPPS，两种方法

的辨识结果如表 3 所示。

表 3 CPPS 继发故障阶段的高危环节

Table 3 High-Risk links in the successive failure period of IEEE 118 bus power CPPS

序号	所提方法辨识结果	文献[35]所提方法辨识结果
1	(70, 75)	(70, 75)
2	(68, 69)	(19, 34)
3	(76, 118)	(76, 118)
4	(69, 77)	(68, 69)
5	(94, 100)	(24, 70)
6	(96, 97)	(69, 77)
7	(80, 96)	(71, 72)
8	(80, 99)	(65, 66)
9	(95, 96)	(94, 100)
10	(90, 91)	(65, 68)

表 3 结果表明，所提方法的辨识结果与文献[35]所提方法有半数相同。对于典型的高危线路，本文所提方法与文献[35]的辨识结果相同。如(70, 75)、(68, 69)、(76, 118)、(69, 77)、(94, 100)这 5 条线路。两种辨识方法都认为其是高危的。此外，所提方法认为(96, 97)、(80, 96)、(80, 99)、(95, 96)、(90, 91)这 5 条线路也是高危的，与文献[35]的辨识结果不同。

为说明所提方法辨识的高危环节更加符合大停电事故防控的需求，本节通过对高危环节施加缓解措施的后果比较辨识结果的有效性。在继发动作阶段，高危环节的故障会推动潮流大规模转移。施加缓解措施可有效抑制连锁故障的后续传播，抑制效果与缓解措施的作用对象有关。在下列 4 类场景中施加缓解措施以对比分析，缓解措施为后备保护过载跳闸闭锁，闭锁线路的停运概率降低 90%。

场景 1：本文所提方法辨识的前 10 条高危故障输电线路后备保护过载跳闸闭锁；

场景 2：文献[35]所提方法辨识的前 10 条高危故障输电线路后备保护过载跳闸闭锁；

场景 3：随机选择 10 条输电线路，其后备保护过载跳闸闭锁；

场景 4：系统保持原来的运行状态，不施加缓解措施。

为验证所提方法在标准 CPPS 和实际 CPPS 中辨识源发故障阶段高危环节的有效性，分别以 IEEE 118 节点 CPPS 和中国某省实际 CPPS 为对象，统计上述 4 类场景下 1 000 次连锁故障仿真的负荷损失，结果如图 9 所示。

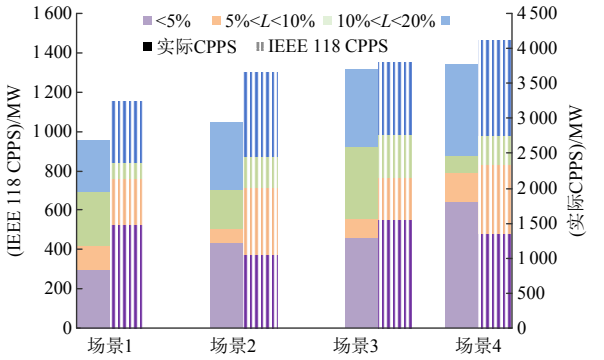


图 9 4 类场景下电力系统负荷损失统计结果

Fig. 9 Statics of power system's load loss in 4 settings

由图 9 可见，对不同的输电线路施加缓解措施后，CPPS 中连锁故障的发展得到了不同程度的抑制，且对所提方法辨识的高危环节施加缓解措施的场景 1 中的抑制效果最明显。

对于 IEEE 118 节点 CPPS，与不加缓解措施的场景 4 对比，场景 1 中的连锁故障平均负荷损失减少了 383.5 MW，大停电事故的降幅为 34%。而在场景 2 和 3 中，减少的平均负荷损失值分别是 296.4 和 24.6 MW。大停电事故的降幅分别为 29%和 5%。中国某省 CPPS 中的算例仿真也表现出相同的结论：对本文所提方法辨识的高危故障输电线路施加缓解措施能够更有效地控制连锁故障的发展。

进一步通过仿真模拟比较所提方法与典型的连锁故障路径分析方法在继发故障阶段的关键传播线路辨识结果上的差异性。以 IEEE 118 节点 CPPS 为对象，基于本文所提的潮流转移相似性方法辨识方法、CFG 方法、基于频繁项挖掘的 FP-Growth 方法以及基于相互超链接关系的 PageRank 方法的辨识结果如表 4 所示。

在继发故障高危环节的辨识结果上，由表 4 可以看出，在排名前 10 的线路中，基于潮流转移相似性的方法辨识出与 CFG 方法、FP-Growth 方法和 PageRank 方法相同的 5 条、4 条和 6 条线路。本文所提方法对典型高危环节的辨识结果与其余 3 种方法具有较高的一致性。

在连锁故障的抑制效果上，对基于潮流转移相似性的辨识结果施加缓解措施后，系统的负荷损失和大停电事故比例的抑制效果都达到最佳。这说明相比其他典型连锁故障路径分析方法，所提方法对继发故障阶段高危环节的辨识结果更符合 CPPS 连锁故障防控需求。

传统的连锁故障高危环节辨识方法忽视了继发故障阶段中的间接潮流转移相似性，这导致辨

表 4　CPPS 继发故障阶段的高危环节辨识效果比较

Table 4　High-risk links identification results comparison in the successive failure period of IEEE 118 bus power CPPS

辨识方法	连锁故障继发故障阶段高危环节辨识结果										连锁故障抑制效果	
											减少负荷损失/MW	大停电事故降幅/%
潮流转移相似性方法	(70, 75)	(68, 69)	(76, 118)	(69, 77)	(94, 100)	(96, 97)	(80, 96)	(80, 99)	(95, 96)	(90, 91)	333.5	34
CFG 方法	(70, 75)	(19, 34)	(76, 118)	(68, 69)	(24, 70)	(69, 77)	(71, 72)	(65, 66)	(94, 100)	(65, 68)	296.4	29
FP-Growth 方法	(96, 97)	(100, 106)	(98, 100)	(94, 100)	(105, 106)	(80, 96)	(70, 75)	(80, 97)	(80, 98)	(69, 77)	280.8	18
PageRank 方法	(68, 69)	(114, 115)	(80, 96)	(90, 91)	(109, 110)	(95, 96)	(100, 101)	(96, 97)	(100, 106)	(94, 100)	303.9	24

识结果不够全面。仿真结果表明，考虑相似性能够更准确地辨识继发故障阶段的高危环节，对这类高危环节施加缓解措施能够更有效地防控大停电事故。

5　结论

源发性组合故障能够诱发连锁故障，进而威胁 CPPS 的安全运行。源发故障阶段和继发故障阶段是连锁故障防控的关键时期。本文重点分析了源发性组合故障的构成及连锁故障传播过程的相似特征，定义了连锁故障发展过程中的直接潮流转移相似性和间接潮流转移相似性的概念，提出一种基于相似性的连锁故障高危环节辨识方法。所提方法在 IEEE 118 节点 CPPS 和中国某省实际 CPPS 算例中进行仿真验证。得到结论如下：

1）基于直接潮流转移相似性能够识别源发故障阶段的高危环节。没有拓扑连接的输电线路也可能存在相似的潮流转移趋势，这类输电线路构成的源发性故障组合更容易触发连锁故障。

2）基于间接潮流转移相似性能够识别继发故障阶段的高危环节。故障输电线路的风险值不仅表达在包含其的连锁故障路径中，也通过与其间接潮流转移相似的故障环节间接地表达在其他故障路径中。

3）施加缓解措施能够抑制连锁故障的发展。考虑相似性能够更准确地辨识继发故障阶段的高危环节，对这类高危环节施加缓解措施能够更有效地防控大停电事故。

本文从相似性的角度分析连锁故障过程，所提方法为连锁故障传播过程分析和预防控制提供了新的研究思路。下一步将考虑多种运行工况下连锁故障发展特征，在风险评估中纳入 OPF 的控制代价，以期实现兼顾连锁故障预防控制和校正控制的协调决策，实现连锁故障的动态预测和信息物理协同防控。

参考文献

[1] 孙华东，许涛，郭强，等．英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]．中国电机工程学报，2019，39(21)：6183-6191．
SUN Huadong，XU Tao，GUO Qiang，et al．Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th，2019 and its enlightenment to power grid in China [J]．Proceedings of the CSEE，2019，39(21)：6183-6191(in Chinese)．

[2] 林伟芳，易俊，郭强，等．阿根廷“6.16”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]．中国电机工程学报，2020，40(9)：2835-2841．
LIN Weifang，YI Jun，GUO Qiang，et al．Analysis on blackout in argentine power grid on June 16，2019 and its enlightenment to power grid in China[J]．Proceedings of the CSEE，2020，40(9)：2835-2841(in Chinese)．

[3] 郭庆来，辛蜀骏，王剑辉，等．由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J]．电力系统自动化，2016，40(5)：145-147．
GUO Qinglai，XIN Shujun，WANG Jianhui，et al．Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system：a lesson from Ukraine's Blackout[J]．Automation of Electric Power Systems，2016，40(5)：145-147(in Chinese)．

[4] 王玮，赵家悦，郭创新，等．考虑故障连锁的多灾害输电网弹性评估及关键弹性提升元件辨识[J]．中国电机工程学报，2022，42(1)：127-139．
WANG Wei，ZHAO Jiayue，GUO Chuangxin，et al．Assessing resilience of transmission network and identifying key elements to enhance resilience considering failure chain under multiple disasters[J]．Proceedings of the CSEE，2022，42(1)：127-139(in Chinese)．

[5] 程林，刘满君，易俊，等．基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及薄弱环节分析[J]．电网技术，2016，40(5)：1488-1494．
CHENG Lin，LIU Manjun，YI Jun，et al．The power system cascading outage simulation and vulnerability analysis based on operational reliability model[J]．Power System Technology，2016，40(5)：1488-1494(in Chinese)．

[6] 张兆云，陈卫，张哲，等．一种广域差动保护实现方法

[J]. 电工技术学报，2014，29(2)：297-303.
ZHANG Zhaoyun，CHEN Wei，ZHANG Zhe，et al. A method of wide-area differential protection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2014，29(2)：297-303(in Chinese).

[7] 曹茂森，王蕾报，胡博，等. 考虑电-气耦合系统连锁故障的多阶段信息物理协同攻击策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：128-136.
CAO Maosen，WANG Leibao，HU Bo，et al. Coordinated cyber-physical multi-stage attack strategy considering cascading failure of integrated electricity-natural gas system[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(8)：128-136(in Chinese).

[8] 蔡晔，刘放，曹一家，等. 电力信息物理系统低代价多阶段高危攻击策略研究[J]. 电力系统自动化，2021，45(20)：1-8.
CAI Ye，LIU Fang，CAO Yijia，et al. Research on low-cost multi-stage high-risk attack strategy for power cyber-physical system[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(20)：1-8(in Chinese).

[9] 丁平，李亚楼，徐得超，等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(31)：77-82.
DING Ping，LI Yalou，XU Dechao，et al. Improved algorithm of fast static state security analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(31)：77-82(in Chinese).

[10] MA Zhiyuan，SHEN Chen，LIU Feng，et al. Fast screening of vulnerable transmission lines in power grids：a PageRank-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(2)：1982-1991.

[11] DENG Chunlan，XIAO Yao，ZHU Qianlong，et al. Mechanism analysis of power grid cascading failures based on data mining algorithm[C]//2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Kristiansand，Norway：IEEE，2020.

[12] WANG Chong，DONG Yunwei，SUN Pengpeng，et al. Cascading failure path prediction based on association rules in cyber-physical active distribution networks[C]// 2020 IEEE 20th International Conference on Software Quality，Reliability and Security Companion (QRS-C). Macau，China：IEEE，2020.

[13] 蔡万通，刘文颖，王方雨，等. 基于临界慢化理论的电力系统自组织临界影响因素阈值计算方法[J]. 电工技术学报，2019，34(5)：1068-1077.
CAI Wantong，LIU Wenying，WANG Fangyu，et al. Computing method of the critical value of power system's self-organized critical factors based on critical slowing down theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(5)：1068-1077(in Chinese).

[14] 曹一家，王光增，曹丽华，等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化，2011，35(7)：1-6.
CAO Yijia，WANG Guangzeng，CAO Lihua，et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(7)：1-6(in Chinese).

[15] 毕如玉，林涛，陈汝斯，等. 交直流混合电力系统的安全校正策略[J]. 电工技术学报，2016，31(9)：50-57.
BI Ruyu，LIN Tao，CHEN Rusi，et al. The security correction strategy in AC and DC hybrid power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2016，31(9)：50-57(in Chinese).

[16] CAI Ye，CAO Yijia，LI Yong，et al. Cascading failure analysis considering interaction between power grids and communication networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2016，7(1)：530-538.

[17] 徐渊，谌艳红，王凯，等. 基于有效约束识别的电网热稳边界辨识方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(11)：54-60.
XU Yuan，CHEN Yanhong，WANG Kai，et al. Identification method of a power grid thermal stability boundary based on effective constraint identification [J]. Power System Protection and Control，2021，49(11)：54-60(in Chinese).

[18] 刘阳，鄢发齐，汪旸，等. 热稳定薄弱断面搜索及限额制定的在线算法[J]. 电力系统自动化，2020，44(21)：156-164.
LIU Yang，YAN Faqi，WANG Yang，et al. Online algorithm for searching and limit setting of thermal-stability weak section[J]. Automation of Electric Power Systems，2020，44(21)：156-164(in Chinese).

[19] 鞠平，姜婷玉，黄桦. 浅论新型电力系统的“三自”性质[J]. 中国电机工程学报，2023，43(7)：2598-2607.
JU Ping，JIANG Tingyu，HUANG Hua. Brief discussion on the “Three-self” nature of the new power system[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(7)：2598-2607(in Chinese).

[20] 戴先中，张凯锋. 复杂电力大系统的递阶结构化模型及自相似特性[J]. 中国电机工程学报，2007，27(25)：6-12.
DAI Xianzhong，ZHANG Kaifeng. Hierarchical structural model of large-scale complex power systems and its self-similarity[J]. Proceedings of the CSEE，2007，27(25)：6-12(in Chinese).

[21] 赵飞. 基于分形理论的电力系统负荷短期预测研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2010.
ZHAO Fei. Research on short-term load forecasting of electrical power system based on fractal theory [D]. Lanzhou：Lanzhou Jiaotong University，2010(in Chinese).

[22] 闫常友，周孝信，康建东，等. 潮流转移灵敏度以及安

全评估指标研究[J]. 中国电机工程学报，2010，30(19)：7-13.
YAN Changyou，ZHOU Xiaoxin，KANG Jiandong，et al. Flow transferring sensitivity and security index analysis [J]. Proceedings of the CSEE，2010，30(19)：7-13(in Chinese).

[23] 甘国晓，耿光超，高波，等. 考虑线路停运概率的电力系统连锁故障阻断控制[J]. 电网技术，2020，44(1)：266-272.
GAN Guoxiao，GENG Guangchao，GAO Bo，et al. Blocking control of power system cascading failures considering line outages probability[J]. Power System Technology，2020，44(1)：266-272(in Chinese).

[24] 陈晓玲，杨军，罗超，等. 一种大电网潮流转移路径快速搜索方法[J]. 电网技术，2015，39(4)：1045-1052.
CHEN Xiaoling，YANG Jun，LUO Chao，et al. A high-speed searching method for power flow transferring paths in large power grid[J]. Power System Technology，2015，39(4)：1045-1052(in Chinese).

[25] 李妍莎，蔡晔，曹一家，等. 面向联合检修的电力信息物理系统输电线路脆弱相关性辨识[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(24)：120-128.
LI Yansha，CAI Ye，CAO Yijia，et al. Vulnerable correlation identification of a transmission line in the power cyber physical system for federated maintenance [J]. Power System Protection and Control，2022，50(24)：120-128(in Chinese).

[26] ZHOU Di，EUGENE STANLEY H，D’AGOSTINO G，et al. Assortativity decreases the robustness of interdependent networks[J]. Physical Review E，2012，86(6)：066103.

[27] ZHAO Narisa，SUI Guoqin，YANG Fan. Effect of heterogeneous interest similarity on the spread of information in mobile social networks[J]. Journal of the Physical Society of Japan，2018，87(6)：064003.

[28] YOO E，GU Bin，RABINOVICH E. Diffusion on social media platforms：a point process model for interaction among similar content[J]. Journal of Management Information Systems，2019，36(4)：1105-1141.

[29] 丁明，钱宇骋，张晶晶. 考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J]. 中国电机工程学报，2017，37(20)：5902-5912.
DING Ming，QIAN Yucheng，ZHANG Jingjing. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment model[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(20)：5902-5912(in Chinese).

[30] 朱国威，王先培，贺瑞娟，等. 基于重要度评价矩阵的电网关键节点辨识[J]. 高电压技术，2016，42(10)：3347-3353.
ZHU Guowei，WANG Xianpei，HE Ruijuan，et al. Identification of vital node in power grid based on importance evaluation matrix[J]. High Voltage Engineering，2016，42(10)：3347-3353(in Chinese).

[31] ROSATO V，ISSACHAROFF L，TIRITICCO F，et al. Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models[J]. International Journal of Critical Infrastructures，2008，4(1-2)：63-79.

[32] 杨挺，闫鹏，蔡绍堂，等. 基于主动割集的电力信息物理系统饱和防御方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(2)：475-487.
YANG Ting，YAN Peng，CAI Shaotang，et al. Research on saturation defense method of power cyberphysical system based on active cut set[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(2)：475-487(in Chinese).

[33] 古思丽，乔骥，张东霞，等. 基于图深度学习的薄弱支路辨识与溯因分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(3)：1004-1017.
GU Sili，QIAO Ji，ZHANG Dongxia，et al. Identification and attribution analysis of weak branches based on graph deep learning[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(3)：1004-1017(in Chinese).

[34] LU Juan，GONG Zhiguo，YANG Yiyang. A matrix sampling approach for efficient SimRank computation [J]. Information Sciences，2021，556：1-26.

[35] YANG Shenhao，CHEN Weirong，ZHANG Xuexia，et al. A graph-based model for transmission network vulnerability analysis[J]. IEEE Systems Journal，2020，14(1)：1447-1456.

李妍莎

在线出版日期：2023-09-20。
收稿日期：2023-04-27。

作者简介：

李妍莎(1998)，女，博士研究生，主要研究方向为电力信息物理系统，yanshali98@qq.com；

*通信作者：蔡晔(1988)，女，博士，副教授，主要研究方向为电力系统运行与控制、电力市场，caiye1988427@126.com；

曹一家(1969)，男，博士，教授，主要研究方向为电力系统安全与控制，大电网智能优化调度，分布式智能系统理论，yjcao@csust.edu.cn；

李政洋(1994)，男，博士研究生，主要研究方向为智能配电网，851182178@qq.com；

施星宇(1989)，男，博士，主要研究方向为智能配电网、新能源电力系统稳定分析与控制、电力信息物理系统，shixingyu89@qq.com。

(编辑　李泽荣，李新洁)