周敏，曹海，张鹏超，等. 基于复杂网络的水电站运行安全风险事件及其演化特性研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2026，57(8)：49-60. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.004

ZHOU Min，CAO Hai，ZHANG Pengchao，et al. Operational safety risk events of hydropower stations and their evolution characteristics based on complex networks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2026，57(8)：49-60. DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.004

基于复杂网络的水电站运行安全风险事件及其演化特性研究

周　敏[1]，曹　海[1]，张鹏超[2]，林俊强[2]，朱博然[2]，任玉峰[1]

(1. 中国长江电力股份有限公司，湖北 宜昌　443000；2. 中国水利水电科学研究院，北京　100038)

摘　要：【目的】水电站运行风险之间存在复杂的因果耦合效应和链式传播，不仅加速了风险事件的动态演化，还增加了风险后果的不可控性和难以预测性。科学识别水电站风险事件及其演化特性，可为水电站安全运行提供重要支撑。【方法】通过对水电站历史风险事件台账进行文本数据挖掘，提取风险触发事件、风险过程事件、风险后果事件及其发展脉络关系信息，构建风险事件的复杂网络模型，定量研究风险事件发展过程的网络拓扑特性与演化特性。【结果】构建的水电站风险传播网络由102个节点和125条有向边组成。其中，“切除机组”节点出度为29，“开关跳闸”节点入度为5，“下游水位异常”节点接近中心性和特征向量中心性均为1，“切除机组→外送通道中断”具有最高边介数；链条“隔离刀闸设备故障→三相电流不平衡→外送通道中断→全部开关断开→全站停电”具有最高的传递概率。【结论】水电站风险网络中节点和链条在风险传播中的功能存在显著差异。出度高与接近中心性高的节点为潜在风险源；特征向量中心性高的节点在网络结构中占据核心地位入度高的节点易成为风险汇聚点；边介数高的链条是关键传导通道，具有显著的桥接作用。高概率的风险演化路径揭示了风险事件间的强因果耦合关系，如“切除机组→外送通道中断→全部开关断开”等关键链条在网络中传播能力强，需重点部署监测与联动防控机制。

关键词：水电站；风险事件；复杂网络；风险演化；传递概率；影响因素；拓扑特性；风险传播

DOI：10.13928/j.cnki.wrahe.2026.08.004　　**开放科学(资源服务)标志码(OSID)：**

中图分类号：TV213.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-0860(2026)08-0049-12

听语音 聊科研 与作者互动

Operational safety risk events of hydropower stations and their evolution characteristics based on complex networks

ZHOU Min[1]，CAO Hai[1]，ZHANG Pengchao[2]，LIN Junqiang[2]，ZHU Boran[2]，REN Yufeng[1]

(1. China Yangtze Power Co.，Ltd.，Yichang　443000，Hubei，China；2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing　100038，China)

收稿日期：2025-03-29；**修回日期：**2025-06-11；**录用日期：**2025-06-12；**网络出版日期：**2025-08-25

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFC3212700)；中国长江电力股份有限公司项目(Z242302042)；湖北省自然科学基金项目(2024AFD356)

作者简介：周　敏(1985—)，女，高级工程师，学士，主要从事水电站调度运行研究。E-mail：zhou_min@ctg.com.cn

通信作者：林俊强(1984—)，男，正高级工程师，博士，主要从事工程安全与调控研究。E-mail：junqiang-lin@hotmail.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract：[Objective] Complex causal coupling effects and cascading propagation exist among operational risks in hydropower stations, which accelerate the dynamic evolution of risk events and increase the unpredictability and uncontrollability of their consequences. Scientific identification of risk events and their evolution characteristics is essential for ensuring the safe operation of hydropower stations. [Methods] Through text data mining of historical risk event logs from hydropower stations, triggering events, process events, consequence events, and their developmental relationships were extracted. A complex network model of risk events was constructed, and the network topology and evolutionary characteristics of the risk event development process were quantitatively analyzed. [Results] The constructed risk propagation network for hydropower stations consisted of 102 nodes and 125 directed edges. The "unit cut-off" node had an out-degree of 29, the "circuit breaker trip" node had an in-degree of 5, and the "abnormal downstream water level" node had both closeness centrality and eigenvector centrality of 1. The edge "unit cut-off → external transmission channel interruption" had the highest edge betweenness. The chain "isolating switch equipment failure → three-phase current imbalance → external transmission channel interruption → all circuit breakers disconnected → total station blackout" had the highest transmission probability. [Conclusion] Significant functional differences are observed among nodes and chains in risk propagation within the hydropower station risk network. Nodes with high out-degree and high closeness centrality are potential risk sources. Nodes with high eigenvector centrality occupy core positions in the network structure, and nodes with high in-degree tend to become risk aggregation points. Chains with high edge betweenness are critical transmission channels with significant bridging effects. High-probability risk evolution paths reveal strong causal coupling relationships among risk events. Key chains such as "unit cut-off → external transmission channel interruption → all circuit breakers disconnected" exhibit strong propagation capability within the network, requiring prioritized deployment of monitoring and coordinated prevention and control mechanisms.

Keywords：hydropower station; risk event; complex network; risk evolution; transmission probability; influencing factors; topological characteristics; risk propagation

0　引　言

随着水电开发技术的成熟和能源需求的不断扩大，水电站成为世界各国水能源利用的主要方式。据统计，全球约三分之二的河流建设了水电站，它们除了发挥显著的发电效益外，还发挥着重要的防洪、灌溉、航运和供水等综合效益[1]。当前，水力发电量在世界能源总产量中占据约 17%[2]，水电站的发电安全是区域、流域甚至国家能源保障的重要基础。然而，水电站的电力生产不仅面临水轮机组、变压器、电网设备设施等电力系统方面的风险，还面临超标准洪水、大坝厂房结构安全、近电厂的库岸边坡失稳等多维安全风险。这些风险源和风险传播链条复杂，若发生水淹厂房或溃坝等重大事故，极易触发多米诺骨牌效应[3]。因此，系统识别水电站的风险链和其演化特性，对于提升水电站防灾减灾能力、保障水电站安全运行，具有重要意义。

目前，国内外学者针对水电站的风险分析和防灾减灾工作进行了大量研究。从研究内容来看，现有成果主要聚焦于单一类型风险对水电站运行的影响，或特定类型设备在特定风险条件下的受灾机制[4-6]。例如，李萍等[7]针对澜沧江流域重大水电工程区地质灾害扰动问题，基于信息量模型引入不同加权方式，构建地质灾害风险性矩阵，从而完成风险性评价，为区域地质灾害风险规划提供了科学依据与技术支撑。崔威等[8]则针对传统单一赋权法存在主观性强、开都河流域上游水电站风险等级难以客观评定的问题，采用博弈论方法构建模糊综合评价模型，提升了风险分级的合理性与准确性。熊珅等[9]以某水电站溢洪道为研究对象，探讨高速水流作用下闸墩的振动特性及其影响因素，为保障水工结构稳定运行提供理论支撑。综上所述，现有研究为识别水电站面临的风险类型与制定相应的防灾减灾策略提供了重要参考。然而，多数研究集中于风险因素本身或风险等级评定，偏重静态分析与单点评价，尚未系统揭示水电站各类风险事件之间的动态传播路径及其演化机制，难以全面支撑对风险链传播特性的深入理解。

随着复杂网络理论的不断发展，越来越多的学者将其应用到社会学、生物学和信息科学等领域[10-12]，用以揭示复杂系统的结构特性与演化机制。已有研究证明将复杂网络方法与风险领域相结合，能够通过因果回路还原历史事件，实现风险发展过程的有效推演[13-14]。在具体应用方面，王远声等[15]基于复杂网络模型构建了瓦斯爆炸风险链的拓扑结构，揭示了煤矿瓦斯爆炸事故的链式演化特征，为厘清风险事件之间的复杂交互关系与制定事故防控对策提供了理论支撑与决策依据。陈慧宇等[16]则构建了面向石油储罐火灾的复杂网络风险评估模型，通过评估节点的重要

度及其之间连边的风险程度，有效辅助应急救援队伍判断事故发展方向、提升响应效率。刘颖颖等[17]利用复杂网络理论刻画城市洪涝风险链的演化过程，构建触发与传播机制网络，并识别关键节点与关键路径，为城市洪涝灾害的综合防控、预警及响应提供了科学基础。高玉琴等[18]在此基础上融合贝叶斯网络与传播模型，提出洪涝风险链的风险评估框架，通过结果分析识别风险链中的关键节点与关键传播路径，为区域防灾减灾策略制定提供了重要参考。综上可见，基于复杂网络方法的风险研究已在火灾、洪涝等典型突发事件领域取得丰富成果，为揭示复杂风险链的传播规律和关键控制点提供了有力工具。

近年来，部分学者开始关注水电站风险的传递机制与演化特征，并开展了相关研究。例如，WANG等[19]对梯级水库坝体风险的研究进展进行了系统综述，分析了中国梯级水库的开发现状与风险管理实践，明确了未来研究的重点方向，有助于推动梯级水库坝风险管理的理论发展与实际应用。李宗坤等[20]考虑到水电站风险具有一定的传递性，将溃坝风险后果划分为直接后果与潜在后果，进一步建立了梯级水库与单库坝体风险计算方法之间的有效衔接机制，为提升梯级水库的风险管理水平提供了技术支撑。ZHANG等[21]则识别了影响水电站运行的风险因素及其传播路径，构建了水电站风险传递的贝叶斯网络模型，并在此基础上识别出关键风险因素与核心传播路径，为流域内梯级水库的规划、设计及运行管理提供了决策参考。尽管上述研究在揭示水电站风险传播机制方面取得了一定成果，但仍主要聚焦于风险要素识别与静态传播路径建模，对风险事件的动态演化过程关注较少。特别是从风险触发事件到风险过程事件，再到风险后果事件的演化过程，也缺乏系统研究。

结合前文对水电站风险研究现状的梳理与复杂网络方法在风险传播建模中的有效应用，本文拟采用文本处理方法，从水电站实际运行的风险事件记录中提取风险诱因、风险过程和风险后果，基于复杂网络法建立风险事件演化过程的拓扑关系，并构建水电站风险事件发展概率模型，以期识别风险事件网络中的关键过程节点和关键链条，为提高水电站突发事件应急处置能力提供技术支撑，进一步提升其防灾减灾与安全保障能力。

1　研究方法

1.1　数据来源

为实现水电站风险事件识别，需收集大规模、多样性的水电站风险事件文本，通过对非结构化文本数据的处理，将其转换成可分析的结构化数据，以挖掘其潜在信息，揭示水电站风险事件的关联关系和演化趋势。本文数据来源于长江流域某水电站2012—2022年期间实际发生的103个风险事件台账。风险事件台账主要包括风险事件描述、风险经过与处理、风险原因与分析，以及未来防范对策。

1.2　文本预处理

为便于更好地识别水电站风险事件并抽取风险事件间的关联关系，需对已收集的台账文本数据进行预处理，构建水电站风险事件文本语料库。预处理的步骤包括词库设定、文本分词、停用词过滤、专业词过滤与文本数据的标准化等步骤[22-24]。目前，缺乏水电站风险识别领域的专业词库，在分词过程中可能会导致将专业词汇分散情况的出现，比如将“打印故障录波”分词为“打印”“故障”和“录波”等，降低水电站风险识别的精准性，引起风险事件的歧义。为此，本文根据水电站风险的发生特性设定了水电站专业词词库辅助提取风险事件，参考通用停用词库过滤文本冗余单词，并依据水电站特性与文本的收集情况，对词库进行更新与检验。此外，本文还引用了气象专业词库、地理信息系统专业词库、水文学专业词库与电力专业词库等水电站所涉及的专业词库，提高本文研究内容所涉及的文本分析任务的准确性和效果。

随着自然语言处理领域的不断发展，一些现有的分词工具或库，如jieba、NLTK、spaCy等，无需手动只需调用相应的接口即可实现文本分词，大大地简化了分词的过程[25]。其中jieba分词因其高效、简易、灵活等特点在中文文本挖掘领域分词工具或库中脱颖而出。本文借用开源统计分析工具R语言平台的jiebaR算法，结合领域通用词库、停用词库以及领域专业词库，完成对水电站风险事件描述语料库的分词与过滤。

1.3　风险事件复杂网络构建

风险事件从触发诱因、过程到后果的演化过程都蕴含着复杂的网络拓扑关系，这种相互连接的结构类似于复杂网络中节点和边的关系。本文将风险事件的演化过程概化为触发事件、过程事件和后果事件。其中节点代表不同事件，边代表事件之间的联系。据此，将水电站风险事件的发展过程与传递关系以水电站风险网络的形式可视化，构建基于文本和事件发展逻辑的风险拓扑网络。在对风险事件进行关联关系分析时，本文借助了R语言平台中的table( )函数来实

现不同风险事件的共现频数计算。该函数在运行共现频率计算时将会创建一个二维表格，通过每一条水电站有效事件描述中是否有共同出现的事件及出现的次数，进而在二维表格中显示出各风险事件共同出现的频数。

复杂网络可表示为 $G=(V, E)$，其中 $V=\{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$ 表示为网络中所包含节点的集合，即水电站风险网络节点单元集合。对于网络中节点的关联关系可以通过有向共现矩阵进行储存，可以表示为 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{(n\times n)}$，其中 a_{ij} 表示 $\boldsymbol{A}$ 矩阵第 i 行第 j 列的数值。$a_{ij}>0$ 表示节点 i 与节点 j 直接相连，节点 i 的发生将导致节点 j 的发生，在水电站风险网络中则表示两个风险事件之间存在有向关联性；若不相连则 $a_{ij}=0$，故形成有向共现矩阵。

1.4　风险网络特性的表征指标

网络节点的度代表了该节点直接连接的边数量，反映该节点在网络中的重要性和影响力[26]。出度表示由此风险事件引发的其他风险事件的数目，描述了节点对其他节点的影响程度，出度越高表明该风险事件的外溢性越大；入度是引起此风险事件的其他风险事件的数目，描述了其他节点对该节点的影响程度，入度越高表明该风险事件的吸收性越大，基于网络的结构特性信息。度的计算公式为

$$K_i=D_i^{\text{out}}+D_i^{\text{in}}=\sum_{i=1,\ i\neq j}^{N}A_{ij}+\sum_{i=1,\ i\neq j}^{N}A_{ji} \tag{1}$$

式中，D_i^{out} 为节点 i 的出度；D_i^{in} 为节点 i 的入度；N 为总节点数；A_{ij} 为节点 i 直接到达节点 j，可以则 $A_{ij}=1$，否则为 0。

接近中心性是衡量该节点与其他节点之间的距离远近。接近中心性越大的节点说明其能在较短路径内接触到大多数其他节点，在网络中通常处于核心位置，具备更强的风险感知与响应能力[27]。接近中心性的公式为

$$C(i)=\frac{N-1}{\sum_{i\neq j}d_{ij}} \tag{2}$$

式中，d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的最短距离；$C(i)$ 为节点 i 的接近中心性。

特征向量中心性是一种基于全局结构信息评估节点重要性的指标，不仅考虑节点自身的连接数量(即度)，还考虑其邻居节点的重要性，节点的中心性越高，其所连接的邻居节点也越重要[28]。特征向量中心性的公式为

$$EC(i)=\lambda^{-1}\sum_{j=1}^{N}a_{ij}e_j \tag{3}$$

式中，λ 为共现矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值，其对应的特征向量 $\boldsymbol{e}_j=[\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2\cdots, \boldsymbol{e}_n]^{\mathrm{T}}$；$a_{ij}$ 为共现矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的基本元素；$EC(i)$ 为节点 i 的特征向量中心性。

边介数是通过节点对经过某条边的最短路径的条数占所有通过该节点对的最短路径个数的比例，是基于网络中的全局信息，介度越高表明该风险事件在网络传播中作用更大[29]。边介数的公式为

$$B_e=\sum_{i\neq j}\frac{\sigma_{ij}(e)}{\sigma_{ij}} \tag{4}$$

式中，σ_{ij} 为节点 i 到节点 j 的所有最短路径条数；$\sigma_{ij}(e)$ 为节点 i 到节点 j 之间经过边 e 的最短路径条数；B_e 为边 e 的介数。

1.5　风险传递概率计算模型

1.5.1　双节点传递概率计算

采用词频共现统计能够定量表征事件之间的关联程度，即两个事件在历史数据中共同出现的次数越多，就说明两者之间的关联程度越高。引入点互信息指数将关联度进一步定量化，其值越大，表明事件之间的关联程度越高[30]。以事件 i 和 j 为例，其关联度 R_{ij} 的公式为

$$R_{ij}=\log\left(\frac{P(i,\ j)}{P(i)P(j)}\right) \tag{5}$$

式中，$P(i,\ j)$ 为事件 i 和 j 同时发生的频数；$P(i)$ 和 $P(j)$ 分别为事件 i 和 j 发生的频数。

由于传统点互信息只考虑了两个事件共同出现的概率与各自出现概率的关系，忽略网络节点连接的方向性，没有考虑节点在网络中的传播能力差异，无法反映网络结构对关联度的影响。故本文将关联性和节点指标进行融合，得到两个事件的概率公式为

$$G_{ij}=\log\left[\frac{P(i,\ j)\times(B_e)}{P(i)\times\left(\frac{D_i^{\text{out}}}{N}\right)\times P(j)\times\left(\frac{D_j^{\text{in}}}{N}\right)}\right] \tag{6}$$

式中，G_{ij} 为事件 i 导致事件 j 发生的概率，其中每个指标均取相对值；B_e 为事件 i 导致事件 j 连边 e 的介数；N 为网络中节点总数。

1.5.2　多节点传递概率计算

本文结合贝叶斯网络计算流程[31]和公式(6)，计算两个以上节点事件的传递概率。以风险节点事件 A→风险节点事件 B→风险节点事件 C→风险节点事件 D 为例，则该多节点的传递概率公式为

$$\begin{cases}P(A\rightarrow D)=P(B\mid A)\times P(C\mid B)\times P(D\mid C)\\ P(B\mid A)=G_{AB}\\ P(C\mid B)=G_{BC}\\ P(D\mid C)=G_{CD}\end{cases} \tag{7}$$

式中，$P(A\rightarrow D)$ 表示多节点传递概率；$P(B|A)$ 为在风险 A 发生的情况下导致风险 B 发生的概率。

2　结果分析

2.1　风险网络特性

基于 1.2 节方法对水电站的原始文本进行文本分割，通过 R 语言平台实现对水电站风险事件的挖掘与提取，为进一步提升这些风险词的可解释性并降低数据维度，本文针对分词提取后的风险事件词库进行了人工检查和降维合并处理，以减少冗余性，提高分析效率。针对上述风险网络模型的构建，本文选用复杂网络分析软件 Gephi 来进行分析。将有向共现矩阵数据导入 Gephi 软件中，建立水电站风险网络拓扑关系如图 1 所示，在该网络中共有 102 个网络节点，125 个连接边，其中红色为触发事件，黄色为过程事件，蓝色为后果事件。

依据式(1)—式(4)计算风险网络的特性的表征指标，结果如表 1 所列。分析发现，出度较高的事件是“开关跳闸”和“直流故障”，表明这些事件在网络中具有较强的传播能力，容易成为其他事件的诱发因素，具有较强的风险外溢性。例如，“开关跳闸”导致下游频率异常，甚至触发保护装置动作，进而诱发切除机组或负荷损失等次生风险。“直流故障”引发电压的波动和失稳极易触发继电保护、设备损坏或功率调度失衡，进一步诱发电压异常等下游事件。

入度较高的事件是“切除机组”和“电压异常”，表明这些事件易受到其他事件的影响，具有较强的风险吸收性。例如，“切除机组”往往是由于线路过载、短路或继电保护动作引发，可能由电压异常或外送通道中断等上游事件触发，表现为多条风险链的收敛点。“电压异常”通常涉及高压直流输电系统的换流站或线路问题，受直流故障等上游事件影响显著，进一步引发区域间功率交换受阻或系统解列。

接近中心性较高的事件是“下游水位异常”“全部开关断开”和“机组停机”，说明这些风险事件在网络中具有较短的平均传播路径，处于风险传播网

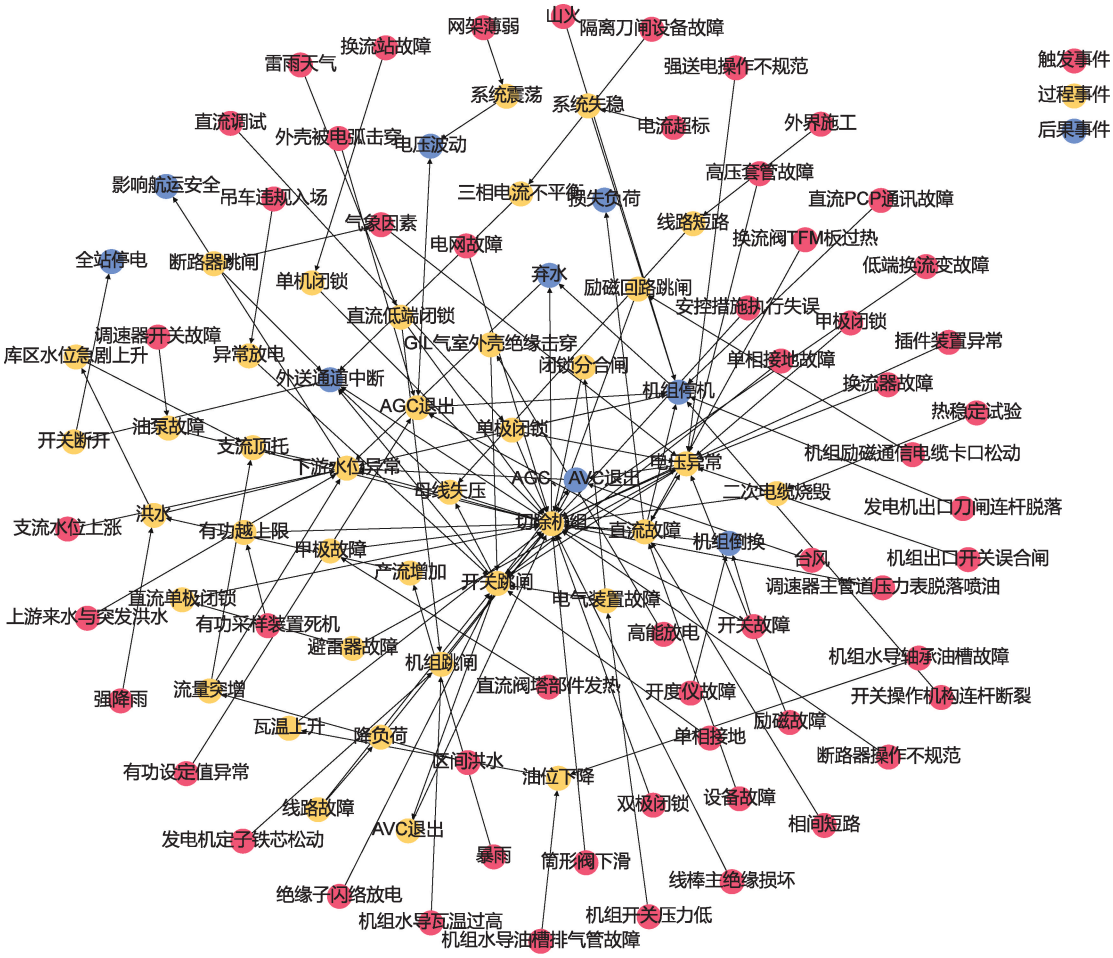


图 1　风险网络拓扑关系

Fig. 1　Topology of risk network

表 1　风险网络特性的表征指标

Table 1　Characterization indicators of risk network characteristics

序号	风险事件	出度	风险事件	入度	风险事件	接近中心性	风险事件	特征向量中心性	风险链条	边介数
1	切除机组	29	开关跳闸	5	下游水位异常	1.000	下游水位异常	1.000	切除机组→外送通道中断	1.000
2	电压异常	10	直流故障	5	全部开关断开	1.000	切除机组	0.713	外送通道中断→全部开关断开	0.990
3	开关跳闸	9	切除机组	3	机组停机	0.750	外送通道中断	0.663	切除机组→下游水位异常	0.734
4	下游水位异常	9	电压异常	3	流量突增	0.750	弃　水	0.550	下游水位异常→影响航运安全	0.637
5	机组停机	8	单极闭锁	3	洪　水	0.667	影响航运安全	0.462	全部开关断开→全站停电	0.502
6	外送通道中断	5	机组停机	2	外送通道中断	0.667	全部开关断开	0.322	切除机组→弃水	0.447
7	AGC 退出	4	AGC 退出	2	弃　水	0.667	AGC、AVC 退出	0.200	电压异常→开关跳闸	0.383
8	直流故障	3	AGC、AVC 退出	2	支流顶托	0.667	开关跳闸	0.141	开关跳闸→外送通道中断	0.322
9	AGC、AVC 退出	3	母线失压	2	上游来水与突发洪水	0.667	全站停电	0.125	电压异常→切除机组	0.252
10	机组跳闸	3	洪　水	2	支流水位上涨	0.667	母线失压	0.125	开关跳闸→切除机组	0.217
11	母线失压	2	直流低端闭锁	2	切除机组	0.600	机组停机	0.124	机组停机→下游水位异常	0.217
12	洪　水	2	电气装置故障	2	开关跳闸	0.588	AVC 退出	0.114	瓦温上升→切除机组	0.190
13	弃　水	2	流量突增	2	AGC 退出	0.556	AGC 退出	0.079	开关跳闸→母线失压	0.183
14	电压波动	2	气象因素	2	断路器跳闸	0.500	电压异常	0.076	开关跳闸→AVC 退出	0.183
15	机组倒换	2	线路故障	2	三相电流不平衡	0.500	电压波动	0.069	AGC 退出→机组停机	0.163

络的关键中枢位置。例如，“下游水位异常”可能由上游机组切除、泄洪调度异常等多种风险触发，同时又能迅速影响航运安全、水工建筑物安全等下游环节，体现出其在多场景、多路径中的枢纽作用。

特征向量中心性较高的事件是“下游水位异常”“切除机组”和“外送通道中断”，表明这些风险事件不仅自身重要，而且与其他重要事件紧密连接，是风险网络中的“核心中的核心”。例如，“切除机组”与多个高风险事件(如开关跳闸、外送通道中断、电压异常)形成紧密耦合，可能因一点触发导致多点扩散，呈现典型的联动放大效应。

此外，边介数较高的风险链包括“切除机组→外送通道中断→全部开关断开”和“切除机组→下游水位异常→影响航运安全”，表明其在风险传播中充当了重要的传导媒介。例如，“切除机组→外送通道中断”主要是由于电力出力减少，功率突变，触发保护装置动作，进一步放大风险范围。“下游水位异常→影响航运安全”可能是机组负荷波动或泄洪调度失误引发，影响航道通行安全，甚至造成船舶搁浅或撞击事故。这些高边介数链条说明，部分事件在网络中具有关键的传导作用，可能成为跨系统、跨领域的风险放大路径，需在防控策略中予以重点关注。

公式(7)计算结果如图 2 所示，为了更直观展示风险网络中的关键过程节点和关键链条，图中节点圆圈按其度数大小进行绘制，边的粗细按其传递概率大小进行绘制。由图 2 可以看出，发生概率较高的风险演化链条主要包括“全部开关断开→全站停电”“相间短路/设备故障/换流阀 TFM 板过热→直流故障”以及“瓦温上升→切除机组”。这些高概率链条揭示了多个关键风险事件之间具有显著的因果关联性，构成了典型的风险传导路径，对水电站运行安全具有重要的工程指向价值。例如，“全部开关断开→全站停电”反映出保护与控制系统中开关设备的集中失效可能直接造成主站系统瘫痪，这在运行管理中提示应重点加强对开关设备状态的实时监测与联锁保护策略优化，以避免关键节点同时失效。“相间短路/设备故障/换流阀 TFM 板过热→直流故障”则揭示了在直流输电系统中，电力电子部件的热稳定性与绝缘性能是保障系统稳定的核心要素，建议在设备运维中增加对换流阀热特性和局部短路隐患的精细化巡检。“瓦温上升→切除机组”则反映出机组轴承温度的异常是系统脱网的直接触发点之一，说明在高负荷或老旧设备运行工况下，瓦温监控应作为运行状态感知的重要指标，建立温度与负荷协同预警机制。

2.2　风险演化特性

经计算，本文风险事件网络的网络直径为 6，即任意两个节点之间的最远路径由 6 个节点连接而成。因此，本文将风险链的长度设定为 5 个节点，可以覆盖风险网络中的大多数情况。基于历史事件

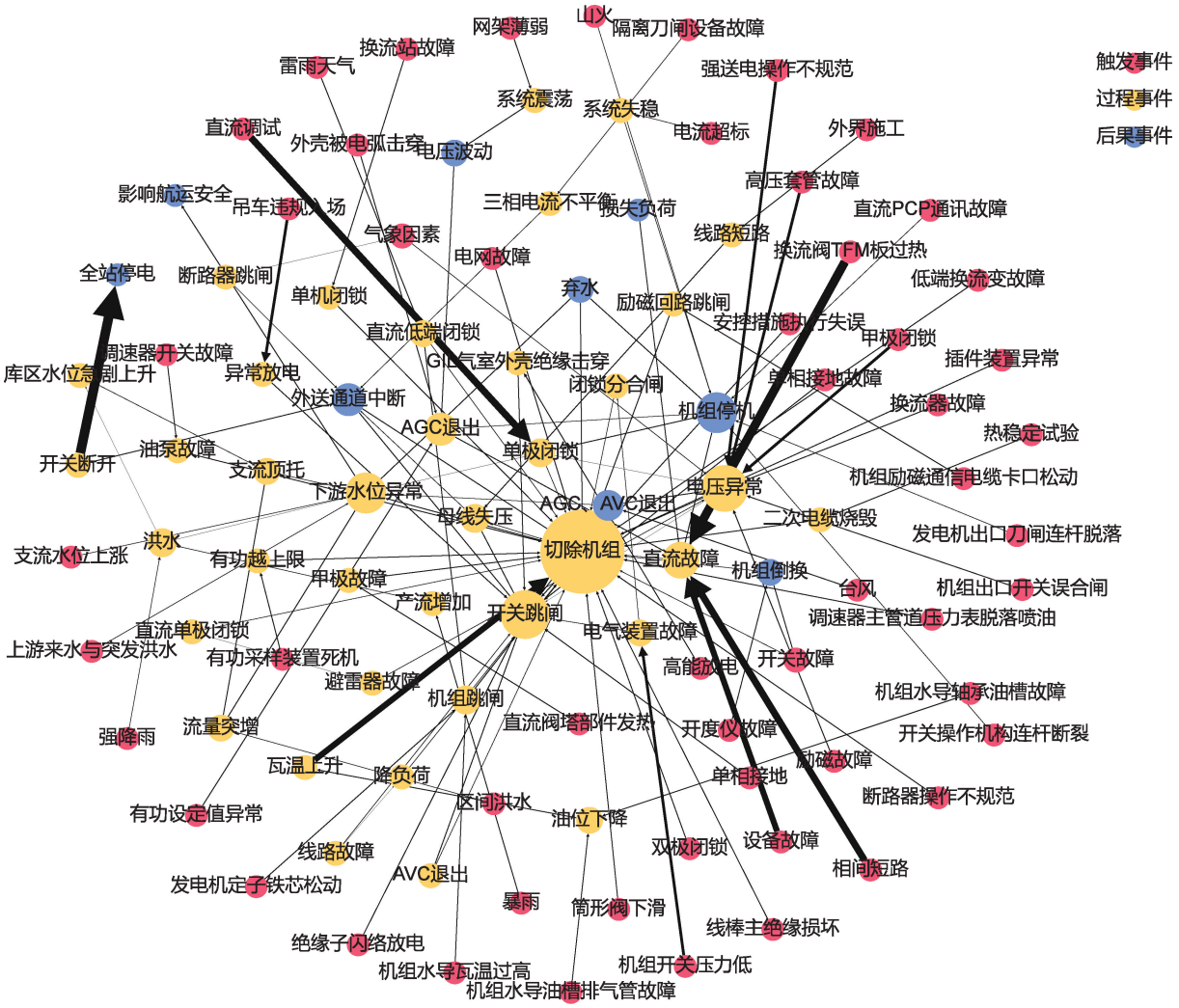


图 2　风险网络特性

Fig. 2　Risk network characteristics

构建的风险网络模型和传递概率计算方法，可以有效识别风险演化的高概率路径。在以 5 个节点为单位的风险链中，共识别出 559 条潜在风险链，部分计算结果如表 2 所列。

由表 2 可知，传递概率最高的风险演化链为“隔离刀闸设备故障→三相电流不平衡→外送通道中断→全部开关断开→全站停电”（传递概率 0.376）和“线路短路→母线失压→外送通道中断→全部开关断开→全站停电”（传递概率 0.283）。这表明电力系统中的关键节点故障在特定条件下极易通过连锁反应引发系统性停电，反映出事件间存在高度的因果耦合，且部分中间节点如“外送通道中断”和“全部开关断开”具备典型的网“汇聚节点”特征，对整个系统的脆弱性有放大效应。例如，隔离刀闸设备故障通常发生在设备老化、绝缘失效或操作失误场景下，该故障可能导致单相或多相接触异常，从而引发三相电流不平衡。当电流不平衡超过保护定值时，继电保护装置动作，切除受影响回路，造成外送通道中断。若系统无备用通道或切换失败，将触发全部开关断开，最终导致全站停电。链条中每一环节均为电气系统中工程逻辑，风险传递路径清晰，响应速度快，导致其传递概率高。

诸如“暴雨→产流增加→洪水→下游水位异常→影响航运安全”（传递概率 0.221）这样的链条体现了自然灾害在水电站风险体系中的关键地位。暴雨导致汇水面积短时产流增加，库区入流迅速上升，若调度响应滞后或泄洪不及时，将导致库区水位抬升并形成大规模洪水，进而影响下游河道水位，最终干扰航运调度。由于气象灾害的不可控性强、影响范围广，相关链条在网络中表现为较强的扩散能力，需在预警和联动调度机制中重点关注。再如，“机组水导轴承油槽故障→油位下降→瓦温上升→切除机组→

表 2　多节点传递概率

Table 2　Multi-node transmission probabilities

序　号	多节点风险传递链	传递概率
1	隔离刀闸设备故障→三相电流不平衡→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.376
2	线路短路→母线失压→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.283
3	外界施工→线路短路→母线失压→外送通道中断→全部开关断开	0.252
4	暴雨→产流增加→洪水→下游水位异常→影响航运安全	0.221
5	气象因素→断路器跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.210
6	网架薄弱→系统震荡→电压波动→AGC 退出→机组停机	0.203
7	电流超标→系统失稳→机组停机→下游水位异常→影响航运安全	0.198
8	机组水导轴承油槽故障→油位下降→瓦温上升→切除机组→弃水	0.192
9	机组水导油槽排气管故障→油位下降→瓦温上升→切除机组→弃水	0.192
10	暴雨→产流增加→洪水→库区水位急剧上升→支流顶托	0.157
11	异常放电→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.150
12	GIL 气室外壳绝缘击穿→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.150
13	安控措施执行失误→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.150
14	单相接地故障→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.150
15	单相接地→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.150
16	绝缘子闪络放电→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开→全站停电	0.150
17	吊车违规入场→异常放电→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开	0.139
18	高能放电→GIL 气室外壳绝缘击穿→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开	0.139
19	外壳被电弧击穿→AGC 退出→机组停机→下游水位异常→影响航运安全	0.127
20	有功设定值异常→AGC 退出→机组停机→下游水位异常→影响航运安全	0.127

弃水”（传递概率 0.192）链条体现了设备局部故障向运行损失的演化机制。水导轴承油槽是保障机组运行过程中轴承温度稳定的关键环节。若油槽排气管堵塞或泄漏，导致油位下降，则润滑及冷却效果显著减弱，瓦温持续升高，一旦超过保护设定值，系统将自动切除机组以防轴瓦烧损，最终形成发电损失和弃水现象。此类链条虽然传播路径短，但节点间物理响应明确、阈值触发敏感，具备典型的“快速联动型”风险特征，因此即使起始故障概率不高，整体传递概率也较大。相比之下，“高能放电→GIL 气室外壳绝缘击穿→开关跳闸→外送通道中断→全部开关断开”（传递概率 0.139）等链条涉及多个设备异常情景，由于初始触发条件较为复杂，或者事件本身概率较低，其整体传递概率相对较小。此类链条通常在极端工况或多重故障叠加条件下才会显现出显著影响，需在多维防御体系中作为补充重点考虑。

2.3　典型事故验证

以该梯级水电站“2013 年 8 月 28 日配合电网线路故障处置引发右岸全厂停电”事故作为对照案例。事故发生时，电站为配合上游电网线路故障处理，因部分输电线路暂时退出运行，外送能力受限，电气保护系统联动响应，触发右岸全部机组切除，形成短时间内的全站停机。根据事故通报与运行调度数据可还原其关键风险传播链为：外送通道中断→全部开关断开→全站停电。该传播路径在本文构建的风险传播网络中不仅完整存在，且在全网传播结构中具有较高的结构中心性与传播倾向性。“外送通道中断→全部开关断开”的边介数值达到 0.990，表示该边处于多条最短路径的核心位置，在风险事件传播中发挥关键桥梁作用；同时其传递概率为 0.80，反映了当上游节点发生风险事件时，向下游传播的现实可能性较高。“全部开关断开→全站停电”边的传递概率为 0.96，属于网络中概率最高的传播路径之一，表明在全部开关断开后，系统整体失稳的演化趋势极强。从结构上看，该路径在网络中构成一条连续、低冗余的关键传导链条，其上下游均无更短或并行可替代路径，具备高度结构唯一性和决策敏感性。

综上所述，模型识别出的“外送通道中断→全部开关断开→全站停电”链条，不仅在结构上与事故发展路径完全一致，且在量化指标上表现为高介数、高概率、高控制影响力，验证了模型在典型事故中的适用性与工程解释能力。

3　结果讨论

3.1　风险发生前重点预防的风险事件

许多学者利用复杂网络、风险链和灾害矩阵等方法对风险进行评估[32-35]。与传统网络指标研究相比，本文在风险研究理论框架的基础上，结合贝叶斯方法，将其应用于水电站的风险管理实践。首先，由于大部分历史案例以报告形式呈现，其信息通常以非结

构化文本为主，难以直接用于统计分析，因此需要借助语义分析技术挖掘文本中的潜在信息，识别风险事件。其次，通过构建复杂网络模型，实现了对历史事件的不确定性发展过程的推演，从而有效提取和吸收历史案例中的表层信息和深层特征。最后，鉴于水电站运行过程中风险具有显著的因果关联和时序特性，本文通过计算风险网络的表征指标与传递概率来量化其级联效应。这种基于历史数据的风险事件概率计算方法，为风险链的随机性与概率演化提供了有效路径，进一步拓展了水电站风险评估的研究视角。

通过对该水电站风险演化路径的系统性分析，揭示了不同风险事件在风险链演化和扩散效应中的差异化特征及其传导作用。研究发现，出度较高的节点(如“开关跳闸”和“直流故障”)通常偏向于诱发其他风险，具有较强的风险外溢性；而入度较高的节点(如“切除机组”和“电压异常”)则易于成为其他风险的汇聚点，具有出较高的风险吸收性。高出度和高入度的节点多位于风险发展的中间环节，表明过程事件在风险传播与积累中发挥着关键作用。接近中心性较高的节点(如“母线失压”和“外送通道中断”)在网络中距离其他节点的平均路径较短，说明其具备更高的风险传播效率。一旦这些节点出现故障，可能在短时间内影响整个网络，因此应作为风险快速扩散的“高效传播源”重点防控。此外，特征向量中心性较高的节点(如“AGC 退出”和“系统失稳”)虽然自身的度值可能并不显著，但由于与多个高影响力节点相连，其系统性影响不可忽视。这些节点往往处于高风险路径的枢纽位置，其波动可能通过对关键节点的联动作用，放大风险传播的连锁效应。

在水电站风险发生前，重点应预防风险网络中出度和接近中心性较高的风险事件，这类节点发生故障或事故后，可能会迅速触发其他风险，导致风险链中的设备和系统功能紊乱。针对这类节点，需要建立精细化的动态监控机制，实时跟踪节点事件的状态变化，精准识别潜在的风险征兆，并通过快速响应措施及时干预，抑制风险扩散趋势。同时，对于特征向量中心性高的节点，应通过系统冗余设计和容错策略提升其稳定性，降低其对系统其他高影响节点的耦合强度，避免因局部扰动演变为系统性失稳。此外，入度较高的节点易成为其他风险的集中影响点，需要通过构建灵活的联动响应机制，增强系统在复杂扰动条件下的韧性，防止局部风险积累演变为系统性失稳。

3.2　风险发生后重点阻断的传递链条

通过对该水电站风险链条的深入分析发现，部分边介数较高的风险链条(如“切除机组→外送通道中断→全部开关断开”以及“切除机组→下游水位异常→影响航运安全”)在网络中起到了关键的传导枢纽作用。一旦此类高介数边被触发，极易引发多路径、多层级的风险快速扩散，尤其在缺乏冗余保护机制或联动响应体系的情况下，可能导致局部故障演化为系统性风险事件，形成典型的“由点及面”扩展效应。在工程实践中，需重点识别和管控这些位于关键传播通道上的高介数边所对应的设备和运行场景，优先制定针对性的故障隔离策略与分区联动响应预案，从而增强系统的抗冲击能力和运行韧性。

通过计算多节点的传递概率，发现某些链条(如“隔离刀闸设备故障→三相电流不平衡→外送通道中断→全部开关断开→全站停电”)具有极高的风险传播潜力。这些高风险传播的特性主要归因于关键风险之间的强因果关联性以及单点故障的高触发性。例如，“全部开关断开”作为重要的中间节点，一旦发生故障，大概率导致“全站停电”等系统性后果。此外，风险链条(如“暴雨→产流增加→洪水→下游水位异常→影响航运安全”)揭示了气象因素对水电站运行的广泛影响，这表明风险管理应特别关注气候异常的早期监测与预警。

在水电站发生风险后，需重点关注风险网络中介数较高的链路在风险传播中的桥接作用。这类链路往往连接多个关键节点，决定了事故或故障传导的路径和范围，在发生事故或故障后可能加速风险在系统中的扩散。此外，传递概率较大的链条通常涉及关键设备和系统之间的强耦合关系，一旦发生初始故障，大概率引发一系列衍生性事故，放大风险传播效应。因此，应及时识别并阻断此类高风险链条的传播路径，防止局部事故向系统性灾害扩展。

此外，通过对历史案例构建的风险网络分析，发现风险之间的关联关系不仅依赖于历史数据，还表现出超越案例记录的潜在耦合特性。这表明，同一风险可能引发多条不同风险链，而不同风险链对系统性风险的影响存在显著差异。其中，风险概率较高的风险链通常成为水电站风险防控的关键环节。这些链条中的关键路径对后续风险的触发具有决定性作用，针对这些风险链及其关键路径，及时采取断链或控链措施不仅能够有效阻断风险链的扩散，还能显著降低次生风险的发生概率，从而降低系统性风险。

3.3　对比分析

相较于传统的风险评估方法，故障树分析作为一种典型的自顶向下逻辑推演方法，适用于对特定失效事件进行因果剖析，但其结构为严格的树形结构，节点之间仅支持单向传播且不允许回路，难以刻画实际工程中多事件之间的相互作用和循环反馈特征。类似地，贝叶斯网络虽然具备一定的条件概率推理能力，但其本质上也是一种有向无环图，同样无法表示风险事件之间存在反馈、循环或多路径耦合的复杂关系。

本研究构建的水电站风险传播网络明确允许风险事件之间存在有向回路，能够真实反映风险传播过程中“向上”反馈和“横向”耦合的非线性特征。例如，在系统运行中，电压异常可能导致系统潮流紊乱，进而引发机组跳闸，而机组退出又可能进一步诱发新的电压异常，形成风险事件之间的闭环耦合。传统方法难以表达这类循环路径，而基于复杂网络理论构建的风险传播模型能够全面捕捉风险链中的多级联动关系与递归机制，揭示出风险在系统中不仅向下演化，也存在逆向回流和横向扩散的可能。因此，该模型更适用于刻画水电站复杂运行环境下的风险演化过程，为识别系统脆弱环节和制定靶向防控策略提供了更具现实意义的技术支撑。

3.4　本文研究的局限性

尽管本研究在构建水电站风险网络和揭示风险演化路径方面取得了一定进展，但仍存在局限。首先，所采用的风险事件数据主要聚焦于发电安全相关场景，导致构建的风险网络在拓扑结构和传播规律上可能未能充分涵盖大坝安全、防洪调度、边坡稳定性等其他关键风险领域，从而限制了研究结论在更广泛水电站运行情境中的适用性。其次，尽管选取 103 个风险事件台账用于建模与分析，但仍无法完全反映高复杂度系统下的真实演化机制。未来研究可进一步拓展数据来源，涵盖更丰富的风险类型，并结合跨区域、多源数据融合手段，构建更高维度、更复杂结构的风险演化网络，以提升研究成果的适用广度和准确性。

4　结　论

本文基于历史风险台账数据，应用复杂网络理论，构建了水电站风险网络模型与网络特征表征指标，建立了双节点与多节点的风险传递概率模型，量化研究了风险复杂网络特性及其演化传递特性。主要结论如下。

(1)通过对风险网络拓扑特性的定量分析，可识别重点防范的风险事件。研究表明，该水电站应重点关注开关跳闸和直流故障风险事件发生。若不加以控制，这些事件可能引发机组切除和电压异常等次生灾害，进而加剧风险扩散。因此，需重点针对这些节点所涉及的风险链条进行干预与截断，以遏制风险的进一步传播。对于其他水电站而言，在建立历史风险事件的复杂网络模型基础上，可重点增强高出度和高接近中心性节点的风险控制能力，以降低其外溢性，防止风险扩散至更多下游节点；提升高入度和高特征向量中心性节点的风险承受与消解能力，以提高系统的抗冲击能力。

(2)通过风险传递概率的计算分析，可揭示风险发生后重点阻断的传递链条。例如，“全部开关断开→全站停电”和“设备故障→直流故障”等关键链条在历史案例中均表现出较强的因果传导效应。针对这些链条，采取有效的隔离或干预措施，切断关键风险传播路径，从而优化整体风险防控体系。此外，模型还识别出水电站风险网络中潜在路径长度大于 5 的风险链条共有 559 条，推演出超越历史记录的风险耦合特性，揭示了水电站风险演化过程的复杂性，为探索风险链的随机性和传播路径提供了科学依据。

参考文献(References)：

[1] LI Y K, LIN J Q, LIU Y, et al. Refined operation of cascade reservoirs considering fish ecological demand [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127559.

[2] ZENG Z Z, HUANG J L, XU R R, et al. A global-scale framework for hydropower development incorporating strict environmental constraints[J]. Nature Water, 2023, 1(1): 42-52.

[3] ZHU B R, LIN J Q, LIU Y, et al. Multi-risk interaction analysis of cascade hydropower stations based on system dynamics simulation [J]. Water Resources Management, 2024, 38(1): 45-62.

[4] 赵婷, 焦延涛, 张亚坤, 等. 基于宏—细观模型的石漫滩水库重力坝开裂机理研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(11): 65-68.
ZHAO T, JIAO Y T, ZHANG Y K, et al. Study on cracking mechanism of gravity dam based on macro-micro model[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(11): 65-68.

[5] 李超瑞, 汤明高, 周剑, 等. 乌东德水电站库区滑坡发育分布及蓄水响应规律[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 35-51.
LI C R, TANG M G, ZHOU J, et al. Distribution and impoundment response law of landslides in the reservoir area of Wudongde Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 35-51.

[6] 徐宁, 耿在明, 陈致远, 等. 基于深度迁移学习网络的水电机组故障诊断方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 162-173.
XU N, GENG Z M, CHEN Z Y, et al. Fault diagnosis method for

hydropower units based on deep transfer learning networks[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 162-173.

[7] 李萍, 李丽慧, 刘昊碑, 等. 澜沧江流域重大水电工程扰动灾害风险评价[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 635-647.
LI P, LI L H, LIU H D, et al. Risk assessment of disturbance disater in major hydropower engineering of Lancang river basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 635-647.

[8] 崔威, 李晓英, 郭宜薇. 基于博弈论组合赋权的水电站事故风险评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2): 408-416.
CUI W, LI X Y, GUO Y W. Risk evaluation of hydropower station accidents based on combination weighting of game theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 408-416.

[9] 熊珅, 陆雍容, 张晶晶. 某水电站闸墩流激振动原型观测研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(2): 158-167.
XIONG S, LU Y R, ZHANG J J. Study on prototype observation of fluid induced vibration of sluice pier of a hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(2): 158-167.

[10] SUN Z J, SUN Y N, CHANG X F, et al. Finding critical nodes in a complex network from information diffusion and Matthew effect aggregation[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 233: 120927.

[11] 李明昕, 李星毅, 李仲飞. 基于多层网络模型的上市公司关联演化特征与风险承担水平[J]. 管理评论, 2025, 37(1): 243-256.
LI M X, LI X Y, LI Z F. Evolution characteristics of association and risk-taking level of listed companies based on multi-layer network model[J]. Management Review, 2025, 37(1): 243-256.

[12] XIE X L, HUANG L L, MARSON S M, et al. Emergency response process for sudden rainstorm and flooding: Scenario deduction and Bayesian network analysis using evidence theory and knowledge meta-theory[J]. Natural Hazards, 2023, 117(3): 3307-3329.

[13] 冯仲恺, 高浩宇, 牛文静, 等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究(Ⅱ): 风险传播[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 1-12.
FENG Z K, GAO H Y, NIU W J, et al. Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (Ⅱ): Risk propagation[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 1-12.

[14] 任师华, 赵冬月, 赵小龙, 等. 复合灾害链拓扑结构对灾害演化网络风险的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(12): 5-11.
REN S H, ZHAO D Y, ZHAO X L, et al. Influence of composite disaster chain topological structure on risk of disaster evolution network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(12): 5-11.

[15] 王远声, 景国勋, 郭绍帅, 等. 煤矿瓦斯爆炸灾害的复杂网络分析与断链减灾措施研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(6): 2132-2141.
WANG Y S, JING G X, GUO S S, et al. Complex network analysis for disaster chain evaluation and mitigation of coal mine gas explosions [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(6): 2132-2141.

[16] 陈慧宇, 夏登友, 臧娜, 等. 基于复杂网络的石油储罐火灾事故链风险分析[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(11): 1495-1499.
CHEN H Y, XIA D Y, ZANG N, et al. Risk analysis of oil tank fire accident chain based on complex network[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(11): 1495-1499.

[17] 刘颖颖, 李经纬, 陈睿山, 等. 基于复杂网络的郑州市特大暴雨洪涝灾害链研究[J]. 灾害学, 2024, 39(2): 227-234.
LIU Y Y, LI J W, CHEN R S, et al. Analyzing the flood disaster chain in Zhengzhou City based on complex network[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(2): 227-234.

[18] 高玉琴, 徐诺, 汪键, 等. 基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 115-122.
GAO Y Q, XU N, WANG J, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 115-122.

[19] WANG T, LI Z K, GE W, et al. Risk assessment methods of cascade reservoir dams: A review and reflection[J]. Natural Hazards, 2023, 115(2): 1601-1622.

[20] 李宗坤, 王特, 葛巍, 等. 黄河流域梯级水库大坝风险评估与管控的战略思考[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 1-6.
LI Z K, WANG T, GE W, et al. Strategic considerations for risk assessment and control of cascade reservoir dams in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2023, 45(7): 1-6.

[21] ZHANG Y Z, CHEN Q, WANG R K, et al. A study of operational safety risk identification of a cascade reservoir group (I)-Bayesian network-based risk identification for cascade hydropower stations[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48.

[22] LIU M, XU L Y, LIAO P C. Character-based hazard warning mechanics: A network of networks approach[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 47: 101240.

[23] CAO K Y, CHEN S, YANG C, et al. Revealing the coupled evolution process of construction risks in mega hydropower engineering through textual semantics[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102713.

[24] ZHU Y Q, LIAO H M, HUANG D C. Using text mining and multilevel association rules to process and analyze incident reports in China[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 191: 107224.

[25] 国汉君, 赵伟, 宋亚楠, 等. 基于历史事故案例的瓦斯爆炸情景要素提取及情景构建方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(3): 43-49.
GUO H J, ZHAO W, SONG Y N, et al. Research on extraction of gas explosion scenario elements and scenario construction method based on historical accident cases[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(3): 43-49.

[26] 李锋, 张鹏超, 李慧敏, 等. 水网结构对多灾害情景的韧性响应研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 63-72.
LI F, ZHANG P C, LI H M, et al. Research on the resilience response of water network structure to multiple disaster scenarios[J].

Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 63-72.

[27] 张彦春，付建斌，李卓，等. 铁路工务作业人因安全事故致因网络模型及防控措施研究[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(11)：5119-5131.
ZHANG Y C, FU J B, LI Z, et al. Study on accident cause network model and prevention measures of human-caused safety accidents in railway public works section[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(11): 5119-5131.

[28] 陈长坤，王思琪，孙凤琳，等. 城市关联基础设施多层网络韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报，2024，34(5)：204-213.
CHEN C K, WANG S Q, SUN F L, et al. A resilience assessment model for multilayer networks of urban interdependent infrastructure[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 204-213.

[29] LIU J B, ZHENG Y Q, LEE C C. Statistical analysis of the regional air quality index of Yangtze River Delta based on complex network theory[J]. Applied Energy, 2024, 357: 122529.

[30] LICARDO J T, TANKOVIĆ N, ETINGER D. A method for extracting BPMN models from textual descriptions using natural language processing[J]. Procedia Computer Science, 2024, 239: 483-490.

[31] 翟于广，任杰，南胜豪，等. 基于动态权重系数多目标优化组合的贝叶斯渗流参数反演及分析[J]. 排灌机械工程学报，2024，42(12)：1259-1265.
ZHAI Y G, REN J, NAN S H, et al. Inversion and analysis of Bayesian seepage parameters based on multi-objective optimization combination of dynamic weight coefficients[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(12): 1259-1265.

[32] LI J, YANG Z, HE H X, et al. Risk causation analysis and prevention strategy of working fluid systems based on accident data and complex network theory[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 252: 110445.

[33] WEI M, XU J G. Assessing road network resilience in disaster areas from a complex network perspective: A real-life case study from China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 100: 104167.

[34] 许佳，丁超，张昕禹，等. 基于复杂网络的城市内涝灾害应急管理研究综述[J]. 自然灾害学报，2024，33(3)：1-16.
XU J, DING C, ZHANG X Y, et al. Review of complex network-based urban waterlogging disaster emergency management research[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(3): 1-16.

[35] 金友平，单克，李云涛，等. 基于灾害链及复杂网络理论的城镇燃气管道泄漏灾害演化过程分析[J]. 安全与环境工程，2024，31(2)：34-43.
JIN Y P, SHAN K, LI Y T, et al. Analysis of urban gas pipeline leakage disaster evolution process based on disaster chain and complex network theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(2): 34-43.

（责任编辑　王　璐）