基于链接分析和潮流波动熵的电网关键线路快速辩识

确定连锁故障发生、发展中的关键线路对于预防大停电事故发生具有重要意义，为此在分析现有电网关键线路识别方法不足的基础上，基于链接分析中的PageRank算法思路，提出考虑线路故障影响的改进PageRank算法。首先基于$N-1$故障建立合适的关联度指标表示线路链接关系，构建初始相关性矩阵；其次定义基于潮流波动熵的线路故障影响综合评估指标；接着，在原有链接关系中增设虚拟节点形成扩展迭代矩阵，使迭代过程可以综合反映线路受其他线路故障的影响程度及该线路故障对系统的影响；最后给出基于事故链模型的线路风险重要度计算方法，用以验证上述方法的结果。以IEEE 39节点系统进行仿真，仿真结果验证了该方法的有效性和快速性。

骆婷婷　张晶晶／合肥工业大学电气与自动化工程学院

骆婷婷／硕士研究生

关键词／Keywords

PageRank算法·
潮流波动熵·
关联度指标·
关键线路·
快速辨识·

0　引言

近年来，由于电网的大规模互联，世界范围内发生过多起大停电事故，如2012年国内发生的“深圳大停电”事故[1]等，这些事故均造成了巨大的经济损失。研究表明，大停电事故往往由一系列的连锁性故障导致，因此找到连锁故障发生、发展中的关键线路，对其加强监视与防护，可以有效避免大停电事故的发生。

目前，对电网关键线路辨识的方法主要有以下三类。

1）基于复杂网络介数理念，从拓扑结构角度分析线路在发电机负荷间功率传输中的重要性。文献[2]定义了线路介数指标，但该指标假设发电机负荷节点对之间功率按最短路径传输，忽略了其他传输路径的作用；文献[3]提出了改进方法，定义了电气介数指标，分别对所有发电机负荷节点对增加单位电流，计算线路电流绝对值累加值，但该指标忽略了实际线路潮流的方向性；此外，文献[4]提出“潮流介数”概念，可避免上述不足，但该类方法仅从拓扑结构角度考虑，未考虑线路故障后对系统输电平衡的影响。

2）通过构建潮流熵指标评估线路脆弱性，如文献[5]表示，线路故障引起的潮流转移分布不平衡程度越大，越容易引起剩余线路过载，导致连锁故障发生。但该方法无法体现线路受其他线路故障的影响程度，即线路在连锁故障发展中的关键作用。

3）连锁故障仿真方法。基于复杂系统理论提出的连锁故障OPA模型能通过多次抽样评估初始故障引起的平均损失，但无法考虑各故障环节的推动作用[6]；再者通过OPA仿真模型统计线路故障次数衡量线路关键性则无法体现风险因素[7]。文献[8-9]提出了事故链模型，可以还原连锁故障演化过程，线路重要度评估时可以计及事故链各环节影响和事故链风险因素，在减小搜索空间的同时保证了一定的计算准确度。但总体而言，连锁故障仿真方法工作量均较大，尤其对于大电网而言较为耗时。文献[6]提出将PageRank算法应用于电网关键线路快速辨识，但其仅能反映线路受其他线路故障的影响程度，无法体现线路故障对系统的影响，即其作为初始故障环节对系

安徽省自然科学基金资助项目（1808085ME142）。

统发生连锁故障的促进作用。

考虑以上不足，本文基于链接分析的PageRank算法思想[10]，基于$N-1$故障进行线路关联度指标计算，从而建立线路之间的有向链接关系，形成初始相关性矩阵；结合电网初始运行状态提出潮流波动熵指标用以反映线路故障对系统潮流的冲击影响，建立线路故障对系统影响的综合评估指标；据此在原有相关性矩阵基础上增设虚拟节点形成扩展迭代矩阵，迭代过程可以综合反映线路故障对系统的影响及该线路受其他线路故障的影响程度，从而评估得出连锁故障发生、发展中的关键线路。以IEEE 39节点系统进行算例仿真，仿真结果与基于事故链模型的连锁故障仿真结果进行比较分析，得出本文方法的有效性和快速性。

1 PageRank基本算法

链接分析中的PageRank算法是搜索引擎中的经典算法，其对网页的关键度评价包含两层含义：①如果该网页被越多的网页所引用，那么其关键度越高；②如果该网页被引用的网页质量越高，则该网页关键度越高。因此，PageRank算法的基本思想是：当网页Y_1指向网页Y_2时，Y_1将其自身关键度值按一定权重分配给Y_2，该权重大小取决于Y_1指向Y_2的概率，即按平均分配原则该权重大小与网页Y_1的出度（出链数量）成反比。计算公式为

$$PR(Y_j)=\frac{1-\varepsilon}{n}+\varepsilon\sum_{i=1,j\neq j}^{n}\frac{PR(Y_i)}{C(Y_i)} \tag{1}$$

式中，$PR(Y_j)$为网页Y_j的关键度值；ε为阻尼系数，阻尼系数越大，页面级别的收益越大，但该系数越大，收敛速度越慢，一般推荐ε取0.85；$PR(Y_i)$为链接指向网页Y_j的网页Y_i的关键度值；$C(Y_i)$为页面Y_i的出度；n为网页总数；$(1-\varepsilon)/n$为消除网络悬挂节点（无出度）设置的随机跳转概率，用以保证算法的收敛性。

2 考虑线路故障影响的改进PageRank算法

2.1 线路链接关系的建立

PageRank算法是针对Google网络进行网页节点重要度评估的一种算法，它在对Google网网页节点重要度评价时，重点关心指向该网页节点的其他网页的质量和数目，而电网连锁故障的中间环节是在其他线路故障相关性影响下发生，对连锁故障具有推动作用，因此从这方面因素考虑，对于待评估线路而言，与之相关联（有向相关）的其他线路关键度越高、数量越多，线路表现越为关键。因此将PageRank算法引入电网进行关键线路辨识具有一定的合理性。基于PageRank算法对电网进行线路关键度评估，在指标构建中需由原先网页节点之间的有向链接关系转换为线路之间的有向关系，该关系可通过电气连接关系描述，即用线路故障后对其他线路潮流状态的影响程度表征。表1中列举了基于PageRank算法评估Google网与电网元件关键度的相似之处。

表1 PageRank算法用于Google网与电网元件关键度评估的相似之处

网络	基本元件	元件关系	关键度评价标准	关键性体现
Google网	网页	链接指向关系	指向待评估网页的其他网页的质量和数目	自身网页质量
电网	线路	电气连接关系	与待评估线路关联（有向相关）的其他线路的关键度和数量	在故障发展中的关键作用

假设描述各线路间有向相关性的电网相关性矩阵$\boldsymbol{A}$为

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}0 & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & a_{ij} & 0 & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0\end{pmatrix} \tag{2}$$

式中，n为电网线路总数；a_{ij}定义为关联度指标，表示线路j故障对线路i潮流状态的影响程度，可由下述三个指标构建。

1）负载率指标为

$$\alpha_{\mathrm{L}i,j}=\frac{F_{\mathrm{L}i,j}}{F_{\mathrm{L}i,\max}} \tag{3}$$

式中，$F_{\mathrm{L}i,j}$为线路j故障退出后线路i的潮流值；$F_{\mathrm{L}i,\max}$为线路i能承受的潮流热稳限值。该指标值越大，表示线路j故障引起线路i的过载程度越高，越

容易故障。

2）潮流转移危险度指标为

$$\beta_{\mathrm{L}i,j}=\left|\frac{F_{\mathrm{L}i,j}-F_{\mathrm{L}i}^{0}}{F_{\mathrm{L}i,\max}-F_{\mathrm{L}i}^{0}}\right| \tag{4}$$

式中，$F_{\mathrm{L}i}^{0}$为线路i初始潮流值。该指标反映了线路i的潮流变化情况以及与潮流限值的逼近程度。该指标越大，表明线路j故障后越容易导致线路i发生隐性故障。

3）耦合指标为

$$\gamma_{\mathrm{L}i,j}=\left|\frac{F_{\mathrm{L}i,j}-F_{\mathrm{L}i}^{0}}{F_{\mathrm{L}j}^{0}}\right| \tag{5}$$

该指标表示线路j故障退出后线路i的潮流变化量相对线路j初始潮流的占比，可反映线路i、j之间的关联程度。

因此，关联度指标a_{ij}由下式计算得到

$$a_{ij}=\alpha_{\mathrm{L}i,j}\beta_{\mathrm{L}i,j}\gamma_{\mathrm{L}i,j} \tag{6}$$

2.2 基于潮流波动熵的线路故障影响综合评估指标

熵是对系统混乱程度和无序状态的一种度量方法，广泛用于系统的稳定性和不确定性评估。目前学界基于熵理论已建立了很多描述线路关键性的指标，其可以体现线路故障带来系统潮流转移分布不均衡性的影响，该均衡性越大，说明潮流转移分布越均匀，对系统潮流的冲击作用越小；反之，则潮流越容易转移分布到个别线路，对这些线路的冲击很大，越易引发连锁故障。文献[5]中定义的潮流转移熵仅考虑了潮流转移增量，未考虑线路初始潮流状态。但由于初始正常状态时系统各线路潮流值会存在较大差异，即使小线路（初始正常状态线路潮流值较小）上的潮流转移增量与大线路（初始正常状态线路潮流值较大）相同，表现为潮流转移增量分布平衡，但此时小线路可能已经表现为重载甚至过载，因此为计及系统初始运行状态，提出潮流波动熵指标。

潮流波动指标为

$$E_{\mathrm{L}k,i}=\left|\frac{F_{\mathrm{L}k,i}-F_{\mathrm{L}k}^{0}}{F_{\mathrm{L}k}^{0}}\right| \tag{7}$$

式中，$F_{\mathrm{L}k,i}$为线路i故障后线路k的潮流。该指标值越大，线路k上潮流偏离正常状态的程度越大。

定义线路i开断后线路k的潮流波动率

$$\rho_{\mathrm{L}k,i}=\frac{E_{\mathrm{L}k,i}}{\sum\limits_{k\in\Omega,k\neq i}E_{\mathrm{L}k,i}} \tag{8}$$

根据熵理论，定义线路i故障开断后引起的潮流波动熵$B_{\mathrm{L}i}$为

$$B_{\mathrm{L}i}=-\sum_{k\in\Omega,k=i}\rho_{\mathrm{L}k,i}\ln\rho_{\mathrm{L}k,i} \tag{9}$$

当线路i故障引起的各线路波动程度相等，则潮流波动熵达到最大值，线路i故障对系统潮流的冲击作用最小；反之，熵值越小，波动越不均匀，说明存在少数几条线路潮流波动剧烈的情况越为明显，线路i故障对系统潮流的冲击作用越大。

潮流波动熵指标从能量分布不均衡性角度考虑线路故障对系统的影响，这主要体现故障深度影响，但同时应考虑线路故障对系统整体的能量波动程度，即故障广度影响，因此定义潮流波动总量指标$G_{\mathrm{L}i}$进行该广度影响描述

$$G_{\mathrm{L}i}=\sum_{k\in\Omega,k\neq i}E_{\mathrm{L}k,i} \tag{10}$$

$G_{\mathrm{L}i}$反映线路i故障引起系统整体潮流分布状态相对初始时刻的变化程度，其值越大，线路i故障对系统的影响程度越大。

定义线路故障对系统影响的综合评估指标$H_{\mathrm{L}i}$

$$H_{\mathrm{L}i}=\frac{G_{\mathrm{L}i}}{B_{\mathrm{L}i}} \tag{11}$$

该指标综合考虑了线路故障对系统的深度以及广度影响，考虑因素较为全面，其中，$H_{\mathrm{L}i}$值越大，线路i故障对系统的影响越大，越易引发连锁故障。

2.3 考虑线路故障影响的扩展矩阵构建

若基于2.1节相关性矩阵$\boldsymbol{A}$作为迭代矩阵进行PageRank算法迭代计算，则评估结果仅能计及线路受其他线路故障的影响程度，却无法体现线路故障对系统的影响，而不同的线路故障对系统的影响不同。因此，需在PageRank算法基础上计及线路故障影响，为此考虑增设一“虚拟节点”，形成扩展迭代矩阵，使迭代过程可以综合反映线路故障对系统的影响及该线路受其他线路故障的

影响程度，最终得到综合考虑后的排序结果。改进后的相关性网络结构图如图1所示。

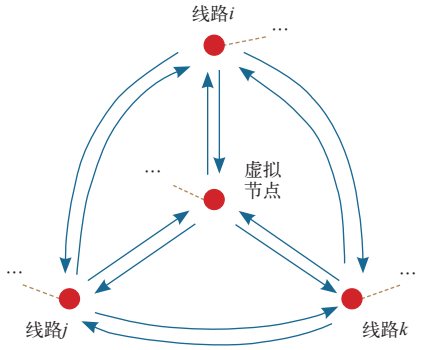

图1 改进的相关性网络结构图

图1表明，每个线路均将自身的关键度值按一定比例η分配给“虚拟节点”，“虚拟节点”关键度值与所有线路的总关键度值成正比，接着，“虚拟节点”根据线路故障对系统影响的综合评估指标大小为线路赋予不同权重，将其关键度值按各权重值分配给相应线路，各线路的权重系数满足

$$w_i=\frac{H_{\mathrm{L}i}}{\sum_{i=1}^{n}H_{\mathrm{L}i}} \tag{12}$$

增设虚拟节点后构成新的扩展矩阵$\boldsymbol{A}'$，矩阵元素a_{ij}'为

$$a_{ij}'=\begin{cases}\dfrac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}}(1-\eta) & i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,n\\ w_i & i=1,2,\cdots,n;\ j=n+1\\ \eta & i=n+1;\ j=1,2,\cdots,n\\ 0 & i=n+1;\ j=n+1\end{cases} \tag{13}$$

形成扩展迭代矩阵$\boldsymbol{D}'$为

$$\boldsymbol{D}'=\frac{1-\varepsilon}{n}\boldsymbol{I}+\varepsilon\boldsymbol{A}' \tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{I}$为除对角元素为0元素，其他元素均为1的$n+1$阶方阵。

设关键度向量$x=(x_1,x_2,\cdots,x_n,x_{n+1})$，则迭代公式为

$$\boldsymbol{x}_{(m)}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{D}'\boldsymbol{x}_{(m-1)}^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

执行迭代过程直到解向量收敛，最终得到的x_i（$i=1,2,\cdots,n$）为线路i的关键度值，从而得到线路关键度排序结果。

式（13）中，调节因子η在（0,1）间变化，该因子过大则会降低线路之间的相关性影响，过小则会减弱线路自身故障影响，因此可将不同η（以步长δ增加）下仿真得到的线路排序结果与不加调节因子得到的排序结果进行差异系数计算，粗粒度寻找差异系数最接近$\theta_{\eta,\max}/2$（$\theta_{\eta,\max}$为最大差异系数）时对应的η值，认为此时η值计算出的关键度结果为综合考虑后的较优解。

其中，不加调节因子的迭代矩阵$\boldsymbol{D}$为

$$\boldsymbol{D}=\frac{1-\varepsilon}{n}\boldsymbol{e}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}+\varepsilon\boldsymbol{A}^{(1)} \tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{e}$为元素全为1的n维列向量，$\boldsymbol{A}^{(1)}$为矩阵$\boldsymbol{A}$内元素按列归一化后的矩阵。

差异系数θ_η定义如下，即

$$\theta_\eta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(i-Z_{L(i)})^2}{n}} \tag{17}$$

式中，$L(i)$为调节因子为η时线路关键度排名为i的线路编号；$Z_{L(i)}$为线路$L(i)$在不加调节因子时的关键度排名。

迭代矩阵$\boldsymbol{D}'(\boldsymbol{D})$迭代所得解的唯一性证明：由于迭代矩阵内元素除对角元素出现0元素外，其他元素均为正数，因此该矩阵是强联通性的，说明其具有不可约性；矩阵的各列和均为1，其为随机矩阵；矩阵为非负矩阵，文献[10]证明得出不可约的随机非负矩阵，其最大特征值为1且唯一，因此迭代所得解向量存在、唯一且为正向量。

改进的PageRank算法计算流程图如图2所示。

3 关键线路验证

文献[8]指出事故链模型表征的各中间环节的相关性、连锁性特征与连锁故障相似，且线路重要度评估考虑事故链各环节作用，因此基于该方法仿真所得的关键线路结果对本文方法进行校验。

3.1 事故链预测模型

连锁故障的相关性体现在线路故障退出导致

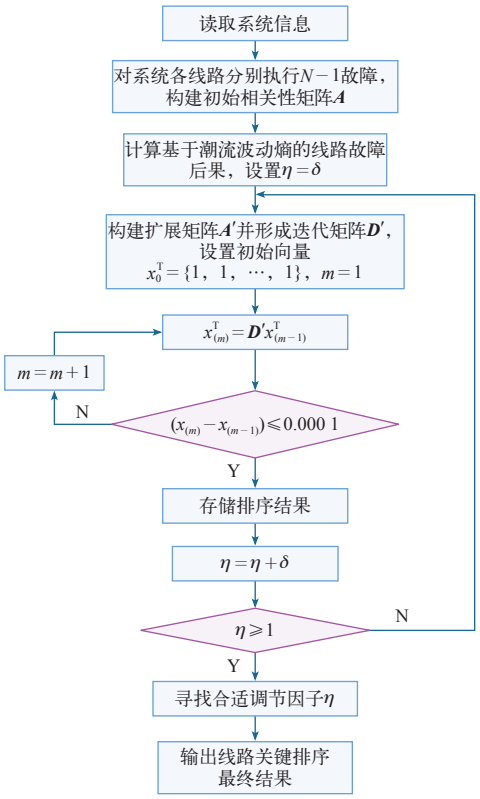

图2　改进PageRank算法计算流程图

的潮流转移作用，线路潮流增加会导致发热熔断或由于测量误差保护误动的概率增大，并且当负载率$\alpha \geqslant 1$时，α越大过负荷保护动作时间越短。因此，根据文献[11]基于线路传输潮流（视在功率L）的线路停运概率模型，设$L^n_{\max}$为线路正常运行时允许传输的最大功率，$L_{\max}$为热稳极限值，预测下级故障线路分为以下两种情况。

1）显式触发。若当前$j-1$状态下存在线路严重越限（$L \geqslant 1.5L_{\max}$），其将在数秒内断开，因此对严重越限线路（K条）执行$N-K$开断；若无线路严重越限，但存在线路越限（$L \geqslant L_{\max}$），则将越限程度最大的线路作为事故链下级环节。此时，系统由$j-1$状态到j状态的转移概率$P_{j-1,j}=1$。

2）隐式触发。若不存在线路越限，则下级故障以一定概率发生，此时选取故障概率最高的线路作为事故链下级环节。状态转移概率$P_{j-1,j}$为

$$P_{j-1,j}=\begin{cases} P_{\mathrm{w}} & 0<L<L^n_{\max} \\ P_{\mathrm{w}}+\dfrac{(1-P_{\mathrm{w}})(L-L^n_{\max})}{L_{\max}-L^n_{\max}} & L^n_{\max}\leqslant L<L_{\max} \end{cases} \tag{18}$$

式中，P_{w}为线路潮流在正常值范围内时的线路停运概率，其取为长期统计值。

事故链预测过程若发生解列则进行功率平衡控制，在功率平衡过程中，对于电力过剩的孤岛，根据每台发电机的出力大小按比例增大出力，若最大发电出力仍小于负荷量，则按负荷比例切负荷；对于电力不足的孤岛，按比例减小发电机出力，若发电量仍大于负荷量，则按比例切机。事故链预测结束判据为：系统暂态失稳或系统孤岛数$d \geqslant 3$。若系统存在n条线路，则最终可得到n条事故链。

3.2　事故链风险评估模型

1）事故链概率P_{C_i}为事故链各环节发生故障的概率的累积，即

$$P_{C_i}=P_0P_{0,1}P_{1,2}\cdots P_{n-1,n} \tag{19}$$

式中，P_0为线路初始故障概率。

2）事故链后果S_{C_i}包括解列后的功率平衡代价、暂态失稳的紧急切机切负荷代价。暂态失稳紧急控制措施及校正控制措施参考文献[12]，S_{C_i}计算公式为

$$S_{C_i}=U_{\mathrm{T}}M_{\mathrm{T}_i}+U_{\mathrm{G}}M_{\mathrm{G}_i}+U_{\mathrm{F}}M_{\mathrm{F}_i} \tag{20}$$

式中，U_{T}、U_{G}和U_{L}分别为发电机出力调整、切机和切负荷的平均单位电能代价，元/MW；M_{T_i}、M_{G_i}和M_{L_i}为发电机调整量、切机量和切负荷量，MW。

3）事故链的风险R_{C_i}为事故链概率与后果的乘积

$$R_{C_i}=P_{C_i}S_{C_i} \tag{21}$$

3.3　关键线路识别

线路的关键性体现在：①在事故链集中出现的次数越多，重要度越高；②所在事故链的风险值越大，重要度越高；③在事故链中的位置越靠前，所占权重越大，重要度越高。

根据文献[13]，线路L_k在事故链C_i中的重要度为

$$W^k_{C_i}=\frac{2^{t-m}}{2^t-1} \tag{22}$$

式中，t为事故链C_i的总环节数；m为线路L_k在事故链C_i中的环节位置，$m=(1,2,3\cdots)$，位置越靠前，m值越小。

因此，线路L_k的风险重要度评估指标为

$$\mathrm{CRI}_{L_k}=\frac{\sum_{i=1,L_k\in C_i}^{n}W_{C_i}^{k}R_{C_i}}{\sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{i=1,L_j\in C_j}^{n}W_{C_i}^{j}R_{C_i}\right)} \tag{23}$$

4　算例分析

以IEEE 39节点系统为例说明所提算法，系统包含34条线路，线路热稳限值$L_{\max}$参考matpower 4.0b5中标准数据，正常运行的潮流最大值$L_{\max}^{n}$取为$L_{\max}$的2/3倍；U_{T}、U_{G}和U_{L}分别取15 元/MW、200 元/MW和700 元/MW[14]；P_0统一设为0.01。本文采用C语言调用软件PSASP进行交流潮流计算、事故链预测和解列后果计算，紧急切机切负荷操作借助PSASP软件进行；采用Matlab进行PageRank算法迭代计算。

4.1　事故链预测和风险评估结果

通过事故链预测和风险评估，得到事故链风险排序表，如表2所示。

表2　风险值较高的事故链预测及评估结果

排序	事故链	概率	后果（$\times10^5$ 元）	风险（$\times10^3$ 元）
1	$L_{27}-L_{29}-L_3-L_{31}-(L_{15},L_7,L_{17},L_{18})$	0.009 93	17.53	17.40
2	$L_{25}-L_3-L_8-(L_7,L_{12})$	0.008 23	11.98	9.859
3	$L_{16}-L_{17}-L_3-L_{31}-L_1$	0.009 24	9.69	8.957
4	$L_{17}-L_{12}-L_{16}-L_3-L_{31}-L_7$	0.009 28	8.73	8.102
5	$L_{29}-L_{23}-L_3-L_{31}-L_7$	0.008 80	7.98	7.025
6	$L_{23}-L_{29}-L_3-L_{31}-L_7$	0.008 80	7.98	7.025
7	$L_{31}-L_3-L_1-L_{22}$	0.009 40	6.91	6.500
8	$L_{18}-L_{12}-L_3-L_{31}-L_7$	0.008 96	7.23	6.483
9	$L_{22}-L_3-L_{31}-L_1$	0.008 20	6.81	5.578
10	$L_2-L_3-L_{31}-L_{22}$	0.008 32	6.91	5.421

从表2中可以看出，线路27作为初始故障引发的事故链风险值最大且与其他事故链风险值相差较大；线路3、线路31在这10条事故链中出现的频次分别为10次、9次；线路22在事故链中较常出现，且其作为初始故障引发的风险值较大，因此这些线路均较为关键。

4.2　PageRank方法仿真结果及各方法比较分析

（1）参数η的确定

将不同η下仿真得到线路排序结果与不加调节因子进行差异系数θ_η计算，步长δ取0.05，得到结果如图3所示。不加调节因子情况计为$\eta=0$，仅考虑潮流波动熵情况计为$\eta=1$。

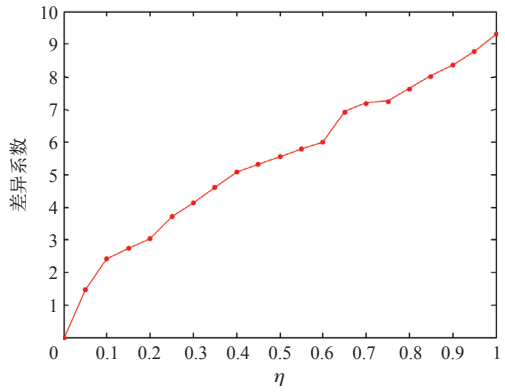

图3　差异系数随η的变化曲线图

从图3中可以看出，η取0.35时，差异系数更接近$\theta_{\eta,\max}/2$，因此认为$\eta=0.35$为综合后的较优值。

（2）方法对比分析

各方法线路排序结果如表3所示。

表3　线路排序结果比较

排序	本文方法	事故链方法	方法一	方法二	方法三	方法四
1	3	3	22	3	27	12
2	27	31	3	31	20	3
3	12	29	14	7	3	17
4	29	27	31	1	4	8
5	31	12	18	22	31	16
6	20	22	12	17	23	18
7	23	17	1	8	29	29
8	8	8	11	12	25	31
9	4	1	9	18	21	33
10	17	16	20	29	22	27

方法一为文献[8]线路风险重要度评估结果；方法二为基于本文事故链集采用文献[9]动态故障树方法进行重要度评估的结果；方法三为仅考虑潮流波动熵因素的排序结果；方法四为不考虑潮流波动熵因素的PageRank算法排序结果。

由表3可以看出，该事故链方法与方法一排名前十的线路中有五条线路是重合的，虽二者均考虑线路所在事故链风险因素和线路出现频次因素，但本文还考虑了线路在事故链中的关键度，因此该事故链方法更加全面。该事故链方法与方法二排名前十的线路中有八条线路是重合的，说

明本文事故链方法对线路关键度评估具有一定准确性。

方法四不考虑潮流波动熵因素，虽然与事故链方法相比，排名前十的线路中有八条线路重合，但排名前五的线路仅识别出两条。方法三排名前十的线路集中有五条线路与事故链方法重合，说明仅从潮流波动熵角度评估关键度的局限性。从本文方法的排序结果可看出排名前十的线路集中有七条线路与事故链方法重合，且排名前五的线路均与事故链方法重合，说明该方法对关键线路辨识的有效性。从排序结果可看出：发电机出线（如线路27、线路29）、热稳限值较小的小线路（如线路12）及联络线（如线路3、线路20和线路31）为故障传播的关键线路，在连锁故障预防时需要特别关注这些线路。

该方法在计算时间上耗时为22.48 s（主要为潮流计算时间），而事故链预测过程需要178.75 s，由于采用PSASP暂稳模块进行紧急切机切负荷操作，其时间无法计量，但显然事故链方法过程繁琐，该方法在保证一定准确性的同时大大降低了计算时间。

将本文方法各线路关键度与事故链方法评估的线路风险重要度归一化值进行对比，如图4所示。

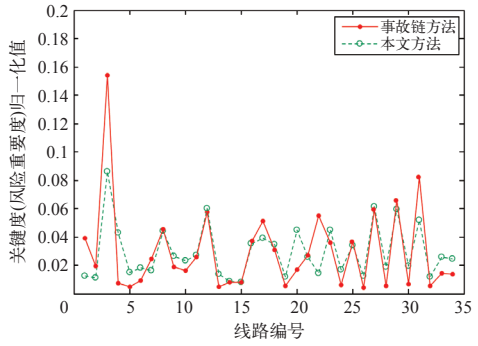

图4　各方法线路关键度值对比图

从图4中对比发现，两种方法中各线路重要程度变化趋势基本一致，且大部分线路用两种方法评估得出的重要程度值差异较小，说明了本文方法及所建指标的有效性。

4　结束语

针对目前电网关键线路评估方法的不足，基于链接分析中PageRank算法的思想，构建$N-1$故障下表征线路之间链接关系的关联度指标，建立初始相关性矩阵；定义基于潮流波动熵指标的线路故障影响综合评估指标；为考虑线路故障对系统的影响，在原有链接关系中增设虚拟节点，构建扩展迭代矩阵。通过对IEEE 39节点系统的仿真，快速辨识出较准确的关键线路，说明所提方法的有效性和快速性。基于$N-1$故障构建的相关性网络虽具有一定的局限性，但其在保证一定准确性的基础上，可快速获取关键线路排序结果，因此可尝试将其应用于大电网的关键线路辨识，对排序靠前的线路应加强监视和防护，避免连锁故障发生。

参考文献

[1] 李俊．深圳电网4·10大停电事件的处理及启示 [J]．南方电网技术，2014，8 (1)：65-69．

[2] 丁明，韩平平．基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法 [J]．电力系统自动化，2006，30 (8)：7-10．

[3] 徐林，王秀丽，王锡凡．电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (1)：33-39．

[4] 刘文颖，梁才，徐鹏，等．基于潮流介数的电力系统关键线路辨识 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (31)：90-98．

[5] 李勇，刘俊勇，刘晓宇，等．基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估 [J]．电力系统自动化，2012，36 (19)：11-16．

[6] 马志远，刘锋，沈沉，等．基于PageRank改进算法的电网脆弱线路快速辨识 (二)：影响因素分析 [J]．中国电机工程学报，2017，37 (1)：36-44．

[7] 刁塑，刘友波，刘俊勇，等．电力系统连锁故障的多层时序运行演化模型与应用 [J]．中国电机工程学报，2015，35 (增刊1)：82-92．

[8] 王安斯，罗毅，涂光瑜，等．基于事故链风险指标的输电脆弱度在线评估方法 []．中国电机工程学报，2010，30 (25)：44-50．

(下转第63页)

3）稳控策略在线优化。基于当前电网运行工况，针对稳控系统覆盖的预想故障，考虑稳定控制措施的约束条件，基于控制代价最小原则，采用安全稳定量化分析技术，首先校核稳控策略下系统的安全稳定性，若系统存在安全稳定问题，则在稳控系统离线策略候选控制空间中进一步追加控制措施，直到系统临界安全稳定；若系统安全稳定，则试探减少控制措施，直到系统临界安全稳定，得到与当前工况相匹配的临界策略，达到稳控策略在线优化目的。

4）大数据挖掘。基于大数据技术，利用在线分析的历史计算数据和结论，开展静态安全变化趋势分析、稳控策略适应性评价及断面稳定极限规律研究等，总结电网运行经验，建立周期性的电网安全后评估机制。

参考文献

[1] 严剑峰，于之虹，田芳，等．电力系统在线动态安全评估和预警系统 [J]．中国电机工程学报，2008，28 (34)：87-91.

[2] 蔡斌，吴素农，王诗明，等．电网在线安全稳定分析和预警系统 [J]．电网技术，2007，31 (2)：36-41.

[3] 李碧君，许剑冰，徐泰山，等．大电网安全稳定综合协调防御的工程应用 [J]．电力系统自动化，2008，32 (6)：25-30.

[4] 国家电力调度控制中心．大电网在线分析理论及应用 [M]．北京：中国电力出版社，2014.

[5] 孙树明，谢昶，吕颖，等．电力系统在线安全稳定分析应用模式 [J]．电网技术，2015，39 (10)：2875-2881.

[6] 严剑锋，冯长有，鲁广明，等．考虑运行方式安排的大电网在线趋势分析技术 [J]．电力系统自动化，2015，39 (1)：111-116.

[7] 谢昶，刘文颖，文晶，等．基于多数据源的日前预报潮流自动生成方法 [J]．电力系统自动化，2012，36 (21)：87-92.

[8] 薛禹胜，费圣英，卜凡强．极端外部灾害中的停电防御系统构思：(一) 挑战与反思 [J]．电力系统自动化，2008，32 (9)：1-6.

（收稿日期：2017－06－20）EA

(上接第58页)

[9] 丁明，肖遥，张晶晶，等．基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型 [J]．中国电机工程学报，2015，35 (4)：821-829.

[10] 谢月．网页排序中算法和算法的研究 [D]．成都：电子科技大学，2012.

[11] 程林，刘满君，何剑，等．基于马尔可夫过程的电力系统连锁故障解析模型及概率计算方法 [J]．电网技术，2016：40 (1)：1-6.

[12] 丁明，朱自强，张晶晶，等．保护隐性故障及其对电力系统连锁故障发展影响 [J]．高电压技术，2016，42 (1)：256-265.

[13] Si Dajun，Sun Qiming，Shi Libao，et al．Analysis of cascading failure considering load-shedding strategy and failure correlation [C]．2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems，2016：1-6.

[14] 崔晓丹，方勇杰，周霞，等．基于风险的输电断面经济输电功率计算 [J]．电力系统自动化，2014，38 (8)：30-34.

（收稿日期：2017－06－06）EA