基于源流路径剖分的输电断面快速搜索

张富超[1]，钟成元[2]，张富春[3]，刘耿华[4]，黄家栋[1]

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院，河北 保定 071003；2. 国网安庆供电公司，安徽 安庆 246003；
3. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司，河北 秦皇岛 066000；4. 吉林电力培训中心，吉林 长春 130062)

摘要：过载支路切除引起大规模潮流转移是导致连锁故障的重要原因。为快速、准确和全面地搜索到受潮流转移影响较大的线路构成的输电断面，提出了一种基于源流路径剖分的输电断面快速搜索算法。该算法首先根据实际电网结构利用图论知识生成有向图，建立送端节点-送电支路邻接表，快速生成源流路径树，逐步搜索有效源流路径链，最后计算所有有效源流路径链中所包含支路的开断分布因子，识别出受潮流转移影响较大的线路。所提算法无需进行全网拓扑搜索，无大规模矩阵运算，因此算法简便，搜索快速。对 IEEE39 节点系统进行仿真分析，其结果证明了所提算法的快速性与正确性。

关键词：源流路径；输电断面；快速搜索；潮流转移；开断分布因子

Fast search of transmission section based on path split between sources and flows

ZHANG Fuchao[1], ZHONG Chengyuan[2], ZHANG Fuchun[3], LIU Genghua[4], HUANG Jiadong[1]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Anqing Electric Power Company, Anqing 246003, China; 3. State Grid Qinhuangdao Electric Power Company, Qinhuangdao 066000, China; 4. Jilin Electric Power Training Center, Changchun 130062, China)

Abstract: Large-scale power flow transferring caused by overload lines removal is an important reason for cascading overload trips. For obtaining transmission section consisting of the lines that affected largely by the power flow transferring, this paper proposes a fast search algorithm about transmission section based on path split between sources and flows. Firstly, the algorithm transforms the actual grid structure into a directed graph using graph theory, then establishes the sending end node-power transmission branch adjacent table and quickly generates path trees of sources and flows. Breaking distributed factors of the branches included in all the effective path chains between sources and flows are calculated. The lines that largely affected by the power flow transferring are identified. This algorithm needn't search for entire network topology and doesn't contain any large mass matrix operations, so it is efficient. Finally, the simulation results of IEEE 39 nodes prove the rapidity and correctness of the algorithm.

Key words: paths between sources and flows; transmission section; fast search; power flow transferring; breaking distributed factors

中图分类号： TM715 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)12-0008-06

0 引言

近年来，世界范围内发生了多起大停电事故，造成了巨大的经济损失。相关研究结果表明：单一故障引起系统失稳从而造成大面积停电事故的概率极低，绝大多数大停电事故是由于运行在极限状态的输电网络受到扰动(断线、停电检修)引起潮流大范围转移，造成其他线路相继过载退出运行，形成连锁故障而发生的[1-6]。电力网络中某一元件出现过载时，不能任由过负荷保护简单地动作切除过载元件，而是要先进行判定：如果切除该元件不会引起其他元件过载则相应的过负荷保护动作；否则应该采取紧急控制措施，消除过载，避免连锁故障的发生。

当某条线路因故障断开时，输电网络中的潮流会大范围转移，但是受潮流转移影响较大的线路并不多，通常不超过全网线路总数的 20%[7]。如果能够快速地搜索到由受影响较大的线路组成的输电断

面，就可以缩小电网安全分析的范围，加快分析的速度，为运行人员留下更多的时间进行决策。

目前，有关专家学者已经展开了关于输电断面识别技术的研究，取得了一定的成果。文献[8]利用电气分区技术搜索输电断面，能够有效地节约在线分析时间，但是容易漏选分区内的过载支路；文献[9]通过搜索与开断支路功率组成相似的支路来确定输电断面，这种算法考虑了系统的实时运行状态，误差较小，但是由于需要计算各发电机对线路功率的贡献因子以及各负荷对线路功率的汲取因子，所以计算量较大，不利于在线应用。

基于现有方法的不足，本文提出了基于源流路径剖分的输电断面快速搜索算法。该算法根据系统中某条支路开断后潮流主要转移到开断支路两端节点间的有向通路上这一特征，在原有源流路径链搜索方法的基础上加入了搜索终止条件，避免了源流路径树的完全搜索，能够快速地搜索到有效源流路径链。最后通过计算有效源流路径链中所含支路的开断分布因子来识别潮流变化较大的支路，进而得到开断支路对应的输电断面。

1　图论基本知识

图论[10]是现代数学的一个重要分支，是一种研究网络中各节点的连接关系及其性质的基本理论。图论往往把实际问题抽象为顶点和支路的集合，然后通过分析网络的拓扑结构来解决实际问题。图可以用集合 $G(V, E)$表示，其中 V 为节点的集合，E 为各节点间相连支路的集合。若图 G 中每条支路都没有方向则称 G 为无向图；若每条支路都是有方向的则称 G 为有向图。

图主要有邻接矩阵法与邻接表法两种储存方式。由于邻接表法的时间复杂度远远小于邻接矩阵法，并且网络规模越大，两者的差别越大，故本文采用邻接表法。

2　源流路径剖分算法

本文提出了一种有效源流路径搜索算法，通过该算法可以简便快捷地搜索出所有源流对之间的有效源流路径。该算法首先根据实际电网结构生成有向图，由有向图的所有节点组成送端节点集合，建立送端节点—送电支路邻接表。选择某一电源节点作为根节点，根节点处于生成树的第一层，然后利用邻接表搜索出与该根节点直接相连的第二层节点及相应的连接支路，最后逐层搜索，直到生成一个完整的路径树。对电力网络中的每个电源节点都进行上述操作，就可以得到整个网络中所有电源的有功潮流传输路径。

2.1 电力网络有向图的表示方法

电力网络是由发电机、变压器、输电线路、母线等一次设备组成的复杂网络，当电网的结构、运行方式确定后，系统的运行状态是确定的。将电网的支路抽象为图中的边，将母线抽象为图中的结点，以支路中有功潮流的方向为支路的方向，由此就可以生成电力网络对应的有向图。图 1 为某一简单系统，按照上述电力网络有向图的生成方法可以得到如图 2 所示的有向图。

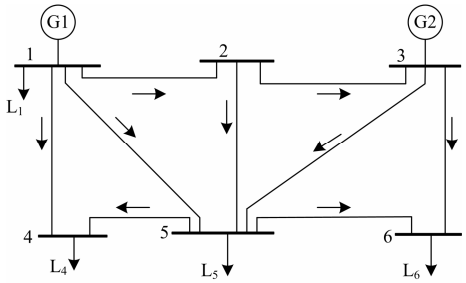

图 1 简单示例系统

Fig. 1 A simple example system

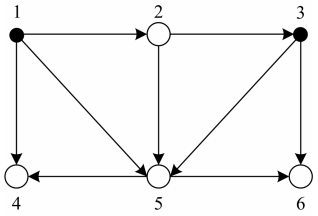

图 2 有向图

Fig. 2 The directed graph

2.2 送端节点—送电支路邻接表的建立

送端节点—送电支路邻接表是一个单链表，有向图中的所有顶点构成了送端节点集合，与送端节点相连并且功率方向为由送端节点流出的所有支路组成了该送端节点对应的送电支路集合。对于无送电支路节点，可视其送电支路数目为 0；对于既带源又带流的节点，可假设存在一条送电支路，这条送电支路两端的节点都是同一个节点。以图 2 为例建立的送端节点—送电支路邻接表如图 3 所示。

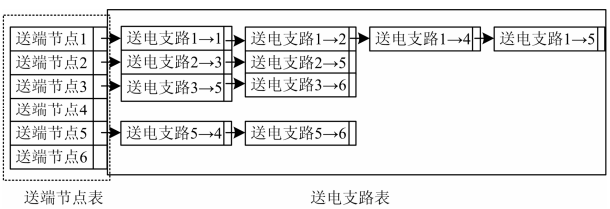

图 3 送端节点—送电支路邻接表

Fig. 3 Node-branch adjacent table

送端节点—送电支路邻接表可以直观形象地展示电力网络中各个节点之间的连接关系，利用该表可以非常方便地得到源流路径树，可以做到不重不漏。

2.3 源流路径树的生成[11]

源流路径树的生成过程本质上属于各节点的逐层遍历过程。首先应该对电力网络的拓扑结构进行分析，确定电源节点的数目，以所有的电源节点为根节点，逐一进行源流路径搜索，得到的所有的源流路径树即为全网源流路径集合。

以某一电源节点为例来展示源流路径树的生成过程。选取该电源节点为根节点，从送端节点—送电支路邻接表中找出该节点的受端节点，并且确定对应的送电支路，组成源流路径树的第二层；第二层的所有节点组成了下一步操作的送端节点集合，顺序对该集合中的所有节点进行搜索，在送端节点—送电支路邻接表中找出各个节点对应的送电支路和受端节点，完成该源流路径树的第三层搜索；重复上述过程，直至第 n 层的所有节点都不存在送电支路，即该层的所有节点均为树的叶节点，结束搜索，得到一棵完整的源流路径树。

2.4 源流路径链的获取

所谓源流路径链是指以根节点为出发点以叶节点为终点的中间无分叉的有向通路，有向通路中所包含的所有支路为源流路径链的组成支路。

源流路径链的具体获取方法如下：选定某棵特定的源流路径树，从根节点开始进行遍历搜索，首先遍历第二层的所有节点，若第二层中某节点是流节点，则说明该节点没有送电支路，停止搜索，连接该流节点与根节点构成了一条源流路径链，将其放入预先定义的源流路径集中；若第二层中某节点非流节点，则记录该节点与根节点之间的支路，并且准备继续搜索该节点的送电支路。完成对第二层节点的遍历搜索后，以第二层各节点为根节点重复上述操作，逐层遍历。当遍历到某个节点后，整个源流路径树再次生成时，结束源流路径链搜索，至此就获得了对应该树的所有源流路径链。对电力网络中所有的源流路径树进行上述操作，就可以得到整个网络中的所有源流路径链，如图 4 所示。

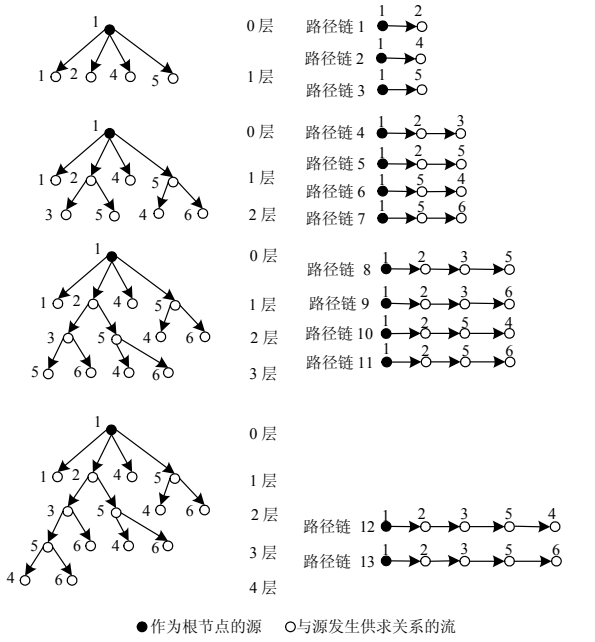

图 4 源流路径链的生成

Fig. 4 Path chains between sources and flows

3 输电断面的快速搜索

3.1 输电断面

输电断面是电力系统安全分析与控制领域的一个重要概念，常常被用于电力系统的状态监视、运行分析与调度决策等日常工作中[12-15]。目前关于输电断面还没有形成一个统一的概念，人们往往根据研究问题的不同对其加以定义[16-18]。本文采用基于潮流转移的输电断面。当系统中的某条支路开断后，会引起大规模的潮流转移。但是并不是每条线路的潮流变化都很大，有些输电线路的潮流变化会很小甚至基本不变。受潮流影响较大的线路构成了输电断面。

3.2 基于源流路径剖析的输电断面快速搜索流程

当系统中某条支路开断后，潮流主要沿着该开断支路两端节点间的有向通路转移；另外，输电断面只与支路的潮流增量有关。考虑到上述两个因素，可以根据叠加原理在原网络的基础上做出潮流转移分量等值网络[19]，然后对潮流转移分量等值网络进行分析得到输电断面。

潮流转移分量等值网络的做法如下：首先将各个电源开路，各个负荷删除，然后将不能构成开断支路两端节点间通路的支路切除，最后根据开断支路原来的潮流方向在潮流流出的那侧节点附加一个功率电源，在潮流流入的那侧节点附加一个负荷，电源输出的功率与负荷汲取的功率大小相等，都等于支路开断前输送的功率。仍然以图 1 为例，支路 L_{12} 开断后其潮流转移分量等值网络如图 5 所示。

支路开断分布因子[20]是电力系统安全分析中的一个重要概念，用来衡量系统中某条支路开断后，其他支路有功潮流变化量占开断支路原来承载的有功潮流的比例。设系统中支路 i 开断，其开断前承载的功率为 P_i，则支路 k 的有功潮流变化量为

$$\Delta P_k^i = D_{k-i} P_i \tag{1}$$

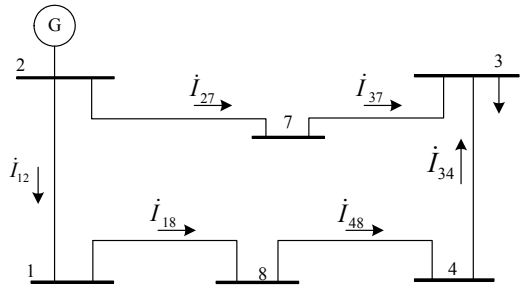

图 5 潮流转移分量等值网络

Fig. 5 Equivalent network of power flow transferring

式中，D_{k-i} 为支路 i 开断，支路 k 的支路开断分布因子，其计算方法为

$$D_{k-i}=\frac{X_{k-i}/x_k}{1-X_{i-i}/x_i} \tag{2}$$

式中：X_{k-i} 为端口 k 与端口 i 之间的互阻抗；x_i、x_k 分别为支路 i、k 的阻抗；X_{i-i} 为端口 i 的自阻抗。

通过计算支路开断分布因子，可以定量地给出网络中剩余支路的潮流变化量占开断支路原来潮流量的百分比，为输电断面的识别奠定基础。

相关知识表明：在电力网络中，功率总是沿着电气距离较短的路径传输。因此，只需要搜索出电抗之和较小的几条源流路径链即有效源流路径链，没必要进行完全源流路径树搜索。

有效源流路径链搜索步骤如下：

(1) 对源流路径树进行逐层搜索，当生成第一条完整路径后，计算该源流路径链所含支路的电抗之和，记为 X_S，假设该条支路为最短源流路径链，即 $X_S=X_{\min}$，其中 $X_{\min}$ 为最短路径的电抗之和。

(2) 继续进行源流路径链搜索，但是需要区分后续搜索到的源流路径链是否为有效路径，区分的判据为 $X_T\le\varepsilon X_{\min}$，其中 X_T 为当前搜索到的源流路径链的总电抗，ε 为路径有效性限制系数。经过大量仿真分析可知，对于一个中等规模的网络来说，ε 取 5 时能够同时保证搜索的速度与精度。对于大型的网络，可以适当增加 ε 的取值。如果当前路径的总电抗满足 $X_T\le X_{\min}$，则令 $X_{\min}=X_T$。

(3) 如果某几条源流路径链中都含有节点 a 和 b，则先需计算这些源流路径链中 a、b 节点间的支路总电抗 X_{ab}，如果某条源流路径链的 $X_{ab}>\varepsilon X_{ab}^{\min}$，则舍弃该条源流路径链。

(4) 如果某条源流路径链已经包含很多节点但是依然没有搜索到流节点，则认为这条源流路径过长，电源与负荷间的电气联系比较弱，停止继续搜索。对于中等规模的网络来说，当源流路径链中包含的节点数目 N 大于 10 时，则该源流路径链包含的支路受潮流转移影响较小，不是电网安全分析的重点，可以舍弃。当网络规模比较大时，可以适当增大 N 的值。

(5) 完成源流路径链搜索后，对搜索到的源流路径链作进一步校验，将所有的源流路径链的总支路电抗与最短路径链的总阻抗值（最终的 $X_{\min}$）进行比较，去除 $X_T>\varepsilon X_{\min}$ 的无效路径。

经过以上各步，可以将输电断面的搜索范围进一步缩小。计算所有有效源流路径链中所包含支路的支路开断分布因子，取满足条件 $D>\delta$ 的支路组成开断支路对应的输电断面，其中 D 为支路开断分布因子，δ 为阈值，一般对于中小型网络 δ 的取值范围为 0.2～0.3。

4　算例分析

以新英格兰 39 节点系统为例，其系统接线图如图 6 所示，系统参数参考文献[21]。本文 δ 的取值为 0.3。

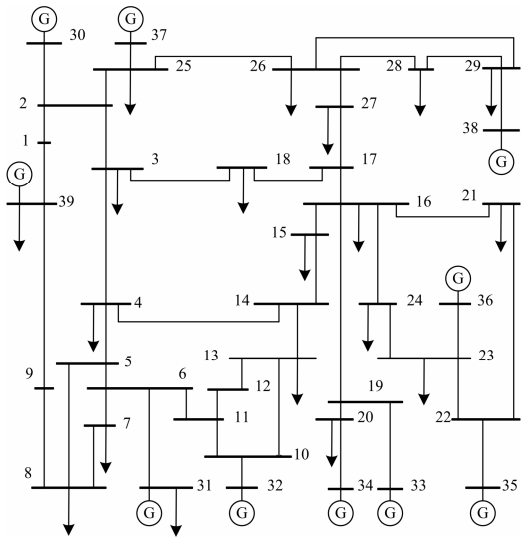

图 6 IEEE 39 节点系统接线图

Fig. 6 Connection diagram of IEEE 39-bus system

为验证算法的有效性，以支路 4-14 为例进行支路开断模拟，当支路 4-14 过载时，以该支路潮流流入点 4 为源节点，流出点 14 为流节点，建立送端节点-送电支路邻接表，生成源流路径树，可获取 9 条源流路径链，然后依据有效源流路径链搜索条件，可得到 3 条有效源流径链，最后计算所有有效源流路径链中所包含支路的开断分布因子，满足 $D>\delta$（δ 取 0.3）条件的支路即为要搜索的输电断面。搜索到的输电断面为潮流增加较大的线路，与完全交流潮流仿真计算结果进行比较见表 1。

表 1 支路 4-14 开断后的输电断面

Table 1 Transmission section after the branch 4-14 slips

开断支路	有效源流路径链	输电断面	开断分布因子	完全交流潮流计算结果
				潮流变化量/MW
4-14	4-5-6-11-10-13-14 4-5-6-11-12-13-14 4-3-18-17-16-15-14	13-14	0.673	172.46
		4-5	0.669	171.60
		6-11	0.668	171.25
		11-10	0.615	157.62
		10-13	0.615	157.62
		5-6	0.611	156.67
		17-16	0.368	94.30
		15-14	0.367	94.22
		4-3	0.367	94.11
		16-15	0.366	93.91

5 结论

本文在源流路径剖分算法的基础上，提出了输电断面快速搜索算法。其优越性在于：①充分利用系统中某条支路开断后潮流主要转移到开断支路两端节点间的有向通路上这一特征，在原有源流路径链搜索方法的基础上加入了搜索终止条件，避免了源流路径树的完全搜索，能够快速地搜索到有效源流路径链。②算法采用邻接表存储方法，较之邻接矩阵存储方法，时间复杂度大大减小，且算法不含复杂的矩阵运算，只需计算有效路径链所含支路的开断分布因子，计算简单，能够快速搜索到输电断面。③当电网发生线路过载时，调度人员只需估计对输电断面的影响，相对全网的交流潮流分析，显著减少了计算工作量，能够有效节约在线分析时间，为后续启动后备保护切除过载或采取紧急控制措施快速消除过载提供宝贵时间，有利于避免连锁故障的发生。

参考文献

[1] 顾雪平, 张硕, 梁海平, 等. 考虑系统运行状况的电网连锁故障风险性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 124-130.
GU Xueping, ZHANG Shuo, LIANG Haiping, et al. Risk assessment of power grid cascading failure considering system operation conditions[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 124-130.

[2] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17.
FU Rong, JIANG Guoping, WANG Baoyun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.

[3] 王英英, 罗毅, 涂光瑜, 等. 电力系统连锁故障的关联模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 204-209.
WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Correlation model of cascading failures in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 204-209.

[4] 卢锦玲, 朱永利. 基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 96-103.
LU Jinling, ZHU Yongli. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.

[5] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.
LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.

[6] 石立宝, 史中英, 姚良忠, 等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 48-54.
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 48-54.

[7] 周德才. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
ZHOU Decai. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.

[8] 赵峰, 孙宏斌, 张伯明. 基于电气分区的输电断面及

其自动发现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 42-46.
ZHAO Feng, SUN Hongbin, ZHANG Boming. Electrical zone division based automatic discovery of flowgates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 42-46.

[9] 程临燕, 张保会, 郝治国. 基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 50-56.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Fast search for key transmission section based on power component of line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 50-56.

[10] 卢开澄. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

[11] 陈彬, 于继来. 电力网络拓扑分析与源流路径链生成算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 25-31.
CHEN Bin, YU Jilai. Algorithm of power network topology analysis and path chains generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 24(1): 25-31.

[12] 张保会, 姚峰, 周德才, 等. 输电断面安全性保护及其关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 1-7.
ZHANG Baohui, YAO Feng, ZHOU Decai, et al. Study on security protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 1-7.

[13] 黄家栋, 张富春, 周庆捷. 基于输电断面识别的电力系统连锁故障风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 30-35.
HUANG Jiadong, ZHANG Fuchun, ZHOU Qingjie. Risk assessment model of cascading failures in power system based on identification of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 30-35.

[14] 郑乔, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于输电线路脆弱性评估的连锁故障预防控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 32-36.
ZHANG Qiao, QIU Xiaoyan, LIU Nian, et al. Cascading failure preventive control based on assessment of transmission line vulnerability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2): 32-36.

[15] 罗钢, 陈金富, 石东源, 等. 基于复杂网络理论的关键输电断面分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 147-155.
LUO Gang, CHEN Jinfu, SHI Dongyuan, et al. Key transmission sections analysis based on complex network throry[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 147-155.

[16] 杨燕, 温福栓, 王洁, 等. 计及关键支路的输电断面自动确定方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 6-10.
YANG Yan, WEN Fushuan, WANG Jie, et al. Automatic discovery of transmission sections considering critical branches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 6-10.

[17] 苗世洪, 马帅, 尚亚男, 等. 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 39-45.
MIAO Shihong, MA Shuai, SHANG Yanan, et al. A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 39-45.

[18] 倪宏坤, 徐玉琴. 基于动态规划原理分支界限算法的关键输电断面搜素方法[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2009, 36(4): 11-15.
NI Hongkun, XU Yuqin. Fast search for the key transmission section based on dynamic-programming principle[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2009, 36(4): 11-15.

[19] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 208-217.

[20] 王增平, 李刚, 任建文. 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 193-201.
WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-201.

[21] PADIYAR K P. Power system dynamics stability and control[M]. Kent, UK: J Wiley Press, 1996.

收稿日期：2014-09-12；　修回日期：2014-10-29

作者简介：

张富超(1986-)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统继电保护及电力系统安全控制；E-mail: 645529490@qq.com

钟成元(1973-)，男，高级工程师，从事电力系统及其自动化方面的工作；

张富春(1984-)，男，硕士，从事电力系统继电保护及电力系统安全控制方面的工作。

(编辑　周金梅)