

# 改进的电力线通信拓扑推测算法<sup>①</sup>

蔡丽萍, 华威, 王林

(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 青岛 266580)

**摘要:** 针对电力线通信(Power Line Communication, PLC)系统拓扑推测过程中旋转节点导致推测失败甚至结果不准确的问题, 提出一种改进的基于断层扫描拓扑推测算法(Advanced Tomography-based Topology Inference). 该方法首先根据拓扑推测过程中旋转节点通信状况确定不稳定性; 然后引入簇内分级机制来降低旋转节点的度, 从而提高拓扑推测结果准确性. 实验表明, 该方法实现了拓扑推测阶段旋转节点的定位及处理, 有效提高拓扑推测准确性.

**关键词:** 电力线通信; 旋转节点; 断层扫描; 不稳定性; 拓扑推测

## Advanced Power Line Communication Topology Inference Algorithm

CAI Li-Ping, HUA Wei, WANG Lin

(College of Computer Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** For the problem that failure nodes lead to inaccurate topology inference results in the power line communication, an advanced Tomography-based topology inference algorithm has been proposed. The algorithm introduces node instability degree and intra-cluster hierarchy to handle with the failure nodes. Firstly the node instability degree is determined according to the failure node communication. And then the intra-cluster hierarchy is used to make the failure node only be a member of the cluster instead of a cluster head. Thus it improves the accuracy of the topology inference result. Experiments show that the algorithm achieves positioning and processing the failure node in the topology inference stage, and effectively improves the topology inference accuracy.

**Key words:** power line communication; failure node; tomography; instability degree; topology inference

电力线通信系统以现有电力线作为传输信号的媒介, 凭借永久在线、覆盖广、成本低等优点而被广泛使用<sup>[1]</sup>. 然而, 电力线通信网络复杂多变的负载, 严重的噪声干扰, 时变信道等特点造成通信链路不稳定<sup>[2]</sup>, 而且在网络运行过程中, 系统中存在的旋转节点(由于自身软件或硬件问题导致通信不稳定的节点, 表现为对系统配置、管理命令无响应或者响应不及时), 是引发 PLC 网络结构脆弱性的原因之一. 为保证网络中数据传输的可靠性, 电力线通信网络的拓扑发现及维护极为重要.

国内外学者对 PLC 网络的拓扑发现及维护进行了大量的研究, 宋其涛等提出了基于蚁群算法的动态拓

扑探测算法<sup>[3,4]</sup>, 戚佳金等则对此进行很多优化, 提出了类蚁群算法<sup>[5]</sup>, 此外还为电力线拓扑引入了非交叠分簇方法<sup>[6]</sup>. 这几种拓扑推测算法均依据电力线通信系统最基本的树形结构进行拓扑推测, 所得到的拓扑结构也能反映电力线通信系统的实际拓扑情况, 但是考虑到实际电力线通信系统拓扑推测过程对时间的要求比较高, 因此希望能够进一步降低算法实现复杂度, 并同时提高拓扑推测的准确性. 由于电力线通信信号贯穿 PLC 网络的特性可以被用来实现 PLC 网络故障诊断<sup>[7]</sup>, 因此文献[8,9]在此基础上提出利用 PLC 信号实现拓扑推测 TTI(Tomography-based Topology Inference)算法. TTI 拓扑推测算法利用贯穿网络的 PLC 信号来

① 收稿时间:2015-09-25;收到修改稿时间:2015-11-23 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005196]

测量通信节点之间的距离, 然后根据拓扑推测公式算出节点之间的关系, 然后利用 RNJ 算法实现邻居拓扑的加入, 并逐步推测出全网的拓扑信息.

TTI 算法在时间复杂度以及收敛程度上优于同类算法, 而且在正常情况下这种算法所得到的 PLC 网络拓扑是比较准确的, 但旋转节点的存在会导致 PLC 网络拓扑推测无法顺利进行. 针对拓扑推测过程中旋转节点导致推测失败甚至结果不准确的问题, 论文在 TTI 算法的基础上, 提出一种改进的基于断层扫描拓扑推测算法, 首先根据拓扑推测过程中旋转节点通信状况确定不稳定性, 然后引入簇内分级机制来降低旋转节点的度, 从而提高拓扑推测结果的准确性和稳定性.

### 1 TTI拓扑推测算法

TTI 拓扑推测主要利用邻居节点加入算法和断层扫描技术相结合实现拓扑推测. 利用广播或者单播的 PLC 信号测量网络中局部拓扑的某一个叶子节点子集所有节点之间的距离选择叶子节点子集中具有最大距离的节点, 并从叶子节点集中删除这两个节点. 为这两个叶子节点生成一个新的双亲节点, 根据这两个节点之间的距离和这两个节点与根节点之间的距离计算出双亲节点的具体位置. 再在剩余叶子节点集中寻找所有距离与被选中节点之间的距离差不到网络中最短路径一半的节点, 这种节点有可能是这两个叶子节点的兄弟节点, 从叶子节点子集中将这种节点删除, 并计算该节点与之间的双亲节点、根节点之间的位置关系. 将双亲节点加入到叶子节点子集中. 重复上述步骤, 直到该叶子节点子集中只剩下一个节点, 该节点是该局部拓扑的根节点的子节点. 然后利用该算法推测出所有局部拓扑的结构关系, 再利用拓扑重构算法从局部拓扑推知全局拓扑. TTI 算法能够从多个局部拓扑的融合得到完整拓扑, 因此是一种深度优先遍历算法. TTI 算法流程图如图 1 所示. 图中 DM 节点即 Domain Master, 是 PLC 通信系统一个台区下的管理节点, 又称为域管理节点, 负责同一台区内所有 PLC 节点的管理、配置和信息的收集等管理功能.

当网络中存在通信不稳定的旋转节点时, 该节点有可能会响应上级节点拓扑探测命令、域地址分配命令等, 也有可能不会响应, 于是就会导致 PLC 网络拓扑推测无法顺利进行, 甚至出现网络断裂、结构不完

整、拓扑不稳定等问题. 针对旋转节点对拓扑推测结果带来的不利影响, 论文对 TTI 算法进行了改进, 提出了 A-TTI 拓扑推测算法.

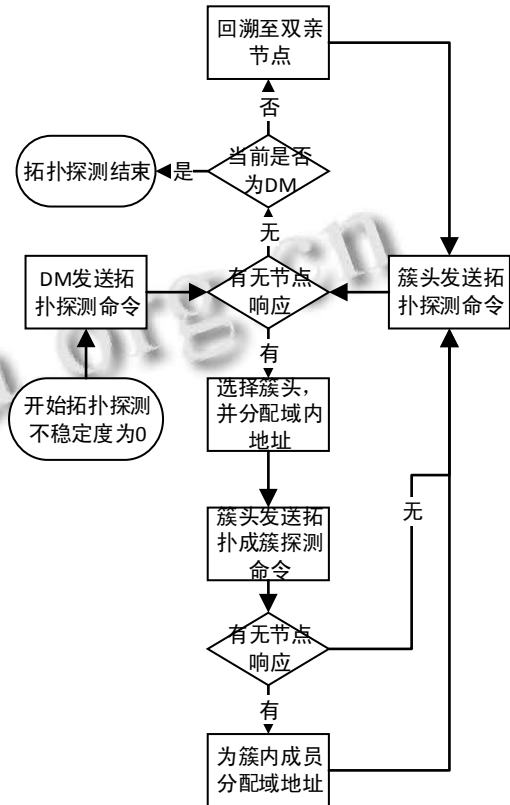


图 1 TTI 算法流程图

### 2 A-TTI算法

为了降低旋转节点导致的结构脆弱性, 增加拓扑推测结果的准确性, 提高拓扑生成率以及生成拓扑的稳定性, 需要在正确辨识旋转节点的基础上适当的处理. 因此首先要对旋转节点进行正确的划分. 即在原有 TTI 拓扑推测算法基础上引入节点的不稳定度来判断旋转节点及其不稳定度. 判断出旋转节点不稳定度之后使用簇内分级机制对旋转节点进行恰当的处理. 最后将这两种方法融合到 TTI 拓扑推测算法过程中实现 PLC 网络的抗旋转技术, 这种改进后的拓扑推测算法称为 Advanced TTI 算法, 简称 A-TTI 算法.

#### 2.1 A-TTI 算法改进要点

##### 2.1.1 节点不稳定性

由于电力线网络的庞大系统结构以及物理环境的复杂性导致形成旋转节点的原因多种多样, 因此形成的旋转节点的具体通信稳定度也并不相同. 而表现在拓扑推测过程中, 就有可能出现以下几种情况:

表1 旋转节点不稳定性表示

	PN-D	PN-A	CN-D	CN-A
正常节点	R	R	NR	NR
旋转节点1类	R	UR	NR	NR
旋转节点2类	R	NR	R	R
旋转节点3类	R	NR	R	UR
旋转节点4类	R	NR	R	NR
旋转节点5类	R	NR	NR	NR

表1中PN代表上级节点;CN代表下级子节点;而-D代表拓扑探测命令,-A代表域地址分配命令;R代表节点正常响应,NR代表节点无响应,UR代表节点的不稳定响应,即在N次发送命令情况下有一次正确响应( $N \leq 3$ ).在拓扑推测过程中发现的旋转节点主要有以上表1所示的5种情况,因此分别用1~5作为该节点的不稳定度,同时在客户端拓扑图上用不同的形状标明,并且根据节点的不稳定度以及是否为簇内成员节点分别处理.旋转节点1类和旋转节点类2在簇内无其它节点时可以单独成簇.旋转节点3类不在簇内则只能作为叶子节点.旋转节点4类和旋转节点5类由于无法正常探测,因此无法作为网络拓扑的组成部分,最终生成的拓扑图中仅标明可能与该节点存在上下级关系的节点,从而为电力系统维护人员提供有效的参考信息.

### 2.1.2 簇内分级机制

由于实际电力输配网络物理分布决定了PLC通信Modem在输电网上稀疏而在配电网用户端密集因此PLC拓扑多采用分簇结构.又由于PLC通信节点不受到能量的限制因此现有大部分PLC通信模块都具有路由转发功能,并且所有正常通信节点计算能力以及信号处理能力、数据转发能力一致,因此PLC通信系统拓扑适宜采用平等分簇结构,即同一簇内任何节点都可以做为簇头或者簇内成员,所有节点均可公平参与竞争临时簇头节点.经过竞争称为临时簇头的节点则负责当前簇内节点信息的采集和转发等.然而当簇内存在旋转节点时,当旋转节点被选为簇头时,由于其通信不稳定的特性会导致整个簇内节点的通信不稳定甚至完全失联,因此必须在平等簇基础上对旋转节点加以处理,因此引入了簇内分级机制.

簇内分级机制规定当簇内有旋转节点时,该节点能且仅能作为簇内节点,而不允许其参与竞争临时簇头节点.簇内分级机制的具体实现方法是为簇内节点设计保留节点,并为保留节点分配特殊的域内地址,

域内地址为保留地址的节点禁止参与临时簇头的竞争.事实上,在PLC通信系统中一个台区内节点的域内地址由域地址长度加上该节点所在簇的分支号和节点的簇内成员号组成,如表2所示.受限于实际变压器所能承载的实际用户数量,因此规定簇成员的上限为255个.同一簇内成员的域地址的簇分支号一致,而末尾两位成员号则为01~FF(十六进制),正常情况下除01为簇头节点外其余按节点响应顺序分配.

表2 域内地址组成

组成部分	参数范围(十六进制)
长度	01~FF
分支号	实际分支号
成员号	01~FF

簇内分级机制规定将FB至FF作为簇内保留地址而分配给旋转节点,并设置FA为标志节点,即当FA节点为空时,FB~FF节点表示旋转节点.而当FA不为空时,01~FE均表示正常节点,仅留FF作为旋转节点的保留地址,如表3所示.簇内分级保留域地址机制对那些簇内旋转节点地址所做的特殊规定,使得簇内的旋转节点在实现通信时易于被辨识,并在制定路由策略时便于避免使用旋转节点作为中继转发节点.

表3 簇内保留地址含义

拓扑算法	标志位	正常节点	旋转节点
TTI	—	01~FF	—
A-TTI	FA空	01~F9	FB~FE
	FA不为空	01~FE	FF

## 2.2 A-TTI 算法实现

### 2.2.1 A-TTI 步骤

- ① DM发送拓扑探测命令,若无节点响应转至4;有节点响则选择合适节点作为临时簇头并分配域内地址.若分配成功转至2;否则转至5;
- ② 簇头节点发送拓扑成簇命令,若无节点响应则转至3.否则为响应节点分配簇内域地址.若所有节点分配成功转至3;否则转至5;
- ③ 簇头节点发送拓扑推测命令,若无节点响应转至4;有节点响则选择合适节点作为临时簇头并分配域内地址.若分配成功转至2;否则转至5;
- ④ 若当前节点不是DM则返回到双亲节点并转至2;否则拓扑推测结束.
- ⑤ 将该节点的不稳定度加1,重新分配域地址1次.如果分配成功则返回;否则转至6;
- ⑥ 再重新分配域地址1次.如果分配成功则返回;

否则节点不稳定性加 1, 并返回.

### 2.2.2 A-TTI 算法流程图

A-TTI 拓扑推测算法实现具体流程图如图 2 所示. 其中两个虚线方框为在原有算法基础上添加的旋转节

点处理流程, 左边的代表簇头节点为旋转节点的处理流程, 右边虚线方框则代表簇内节点为旋转节点的处理流程.

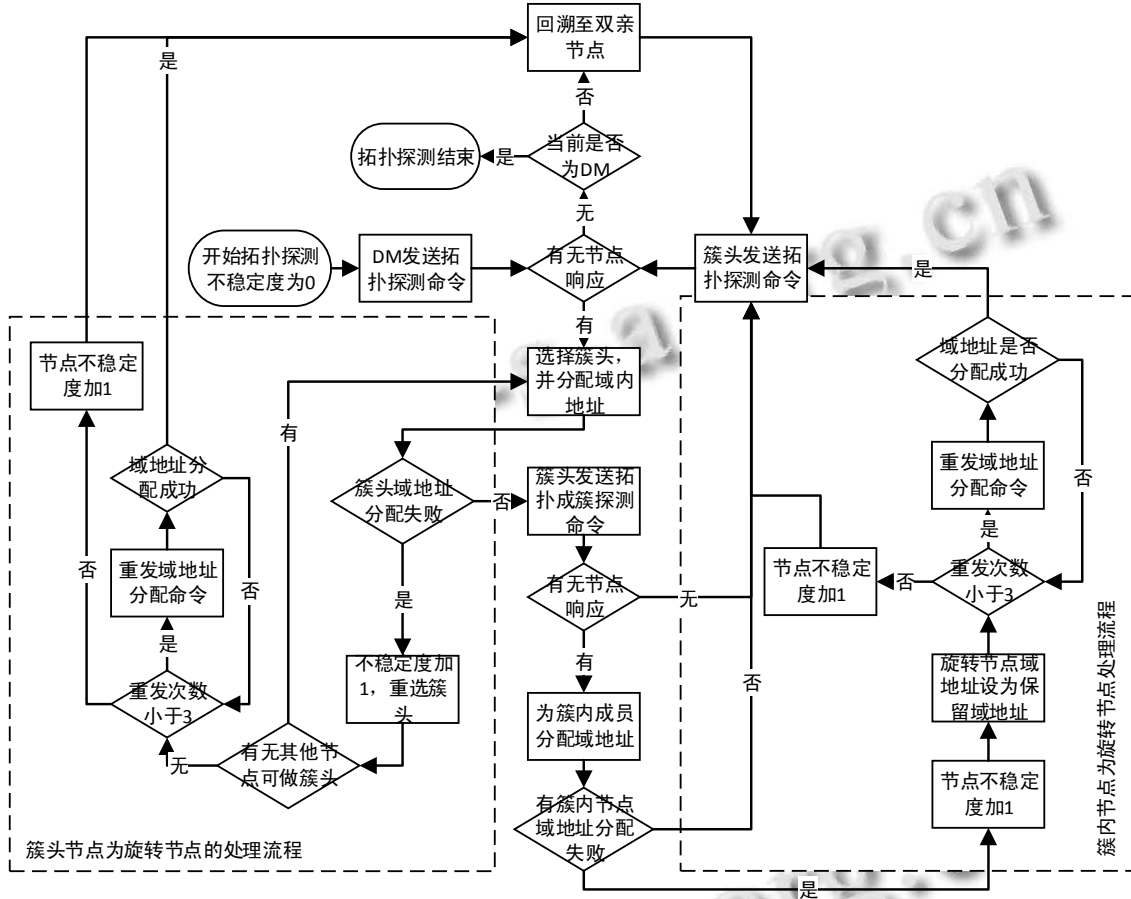


图 2 A-TTI 算法流程图

### 3 A-TTI算法仿真

为了验证 A-TTI 算法的性能, 用 Matlab 仿真工具搭建一个具有 100 个节点的分布在 200\*200m<sup>2</sup> 的物理区域内的电力线路网络的拓扑, 并分别验证了 TTI 拓扑推测算法以及 A-TTI 算法在网络中存在旋转节点情况下拓扑推测准确性. 其中具有 100 个节点的 PLC 通信系统物理拓扑如图 3 所示, 用坐标为(0,0)点的实心方块表示 DM 节点, 图中随机分布的空心圆点则代表安装有 Modem 的 PLC 网络智能电表通信模块. 节点与节点之间的连线表示实际的电力线路, 即 PLC 信号传播的媒介——PLC 通信信道.

图 4 所示为原始 TTI 算法的对图 3 所示的 PLC 通信系统物理拓扑进行拓扑推测结果示意图, 图中实心

圆点表示簇头节点, 而空心圆圈则代表簇内节点. 然而由于实际配电网物理拓扑复杂且时变, 即使是电力公司也很难掌握电力系统的实时物理拓扑. 所以实际上电力系统所掌握的电力系统树形拓扑则如图 5 所示. 图中较大的实心圆点代表簇头节点, 较小的实心圆点代表簇内节点, DM 节点仍然用实心方块表示.

假设网络中 51 号和 1 号节点是旋转节点情况下, TTI 拓扑推测算法的结果和树形拓扑分别如图 6 和图 7 所示, 对比图 4 和图 5 发现, 图 6 局部拓扑遗漏并且图 7 所示树形拓扑也是不完整的树形拓扑. 因此可知理想情况下 TTI 拓扑推测结果比较准确, 但是旋转节点的存在则会导致拓扑推测结果失真, 甚至部分网络拓扑完全丢失.

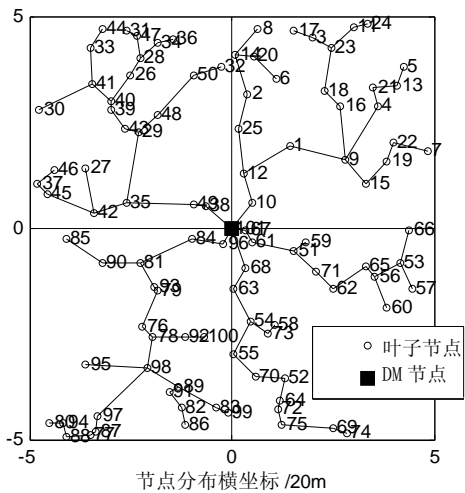


图3 PLC通信系统物理拓扑图

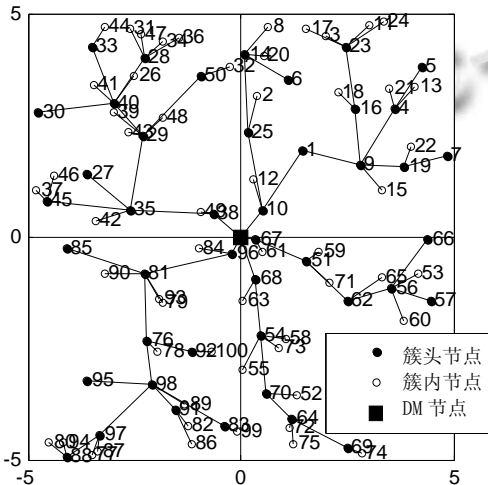


图4 PLC网络正常情况下TTI拓扑推测结果

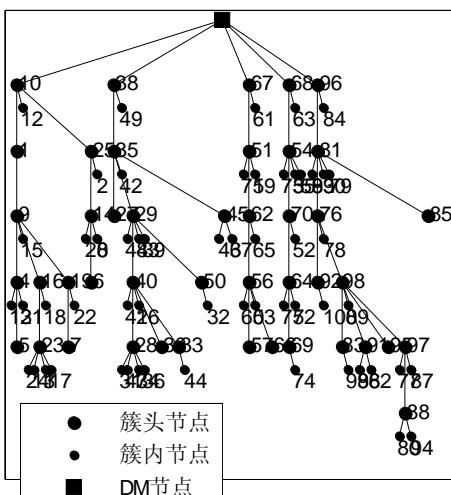


图5 正常情况下TTI树形拓扑

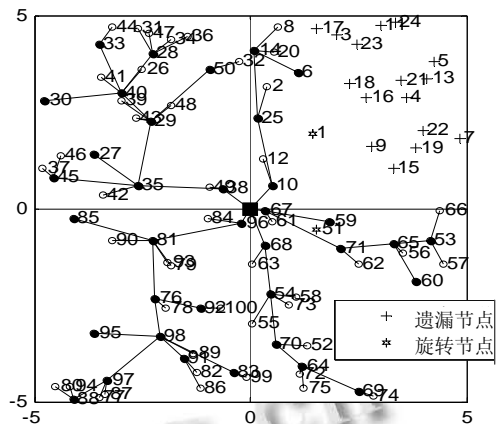


图6 旋转节点情况下TTI拓扑推测结果

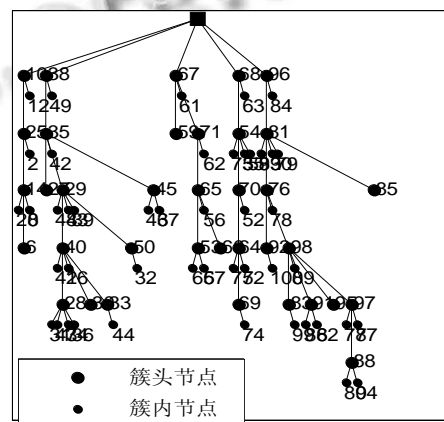


图7 旋转节点情况下TTI推测树形拓扑

在同样的情况下，即51号和1号节点为旋转节点的情况下A-TTI拓扑推测算法的结果示意图和树形拓扑如图8和图9所示。A-TTI采用多次重复判定该1号旋转节点是较低不稳定性，因此得到较为完整的图9所示树形拓扑。对比图9和图7发现，A-TTI算法推测结果更为完整也更加准确，并且将拓扑中存在的旋转节点的位置明确的表示了出来，为电力系统维护人员提供了可靠的参考信息。

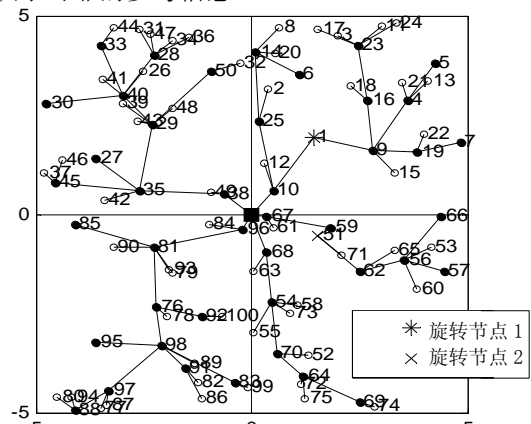


图8 旋转节点情况下A-TTI拓扑推测结果

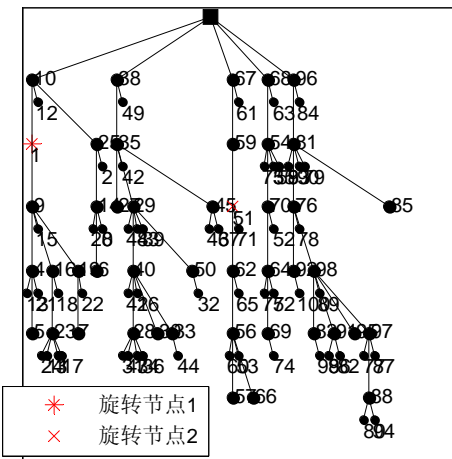


图 9 旋转节点情况下 A-TTI 拓扑推测树形拓扑

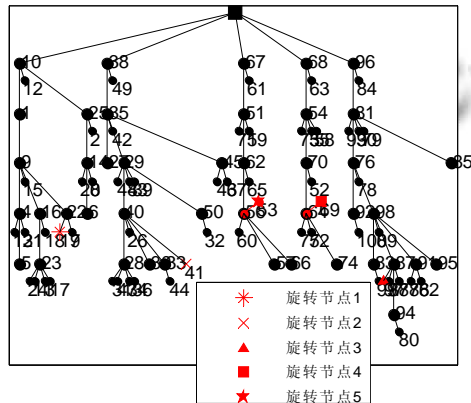


图 10 存在多种旋转节点情况下的 A-TTI 树形拓扑

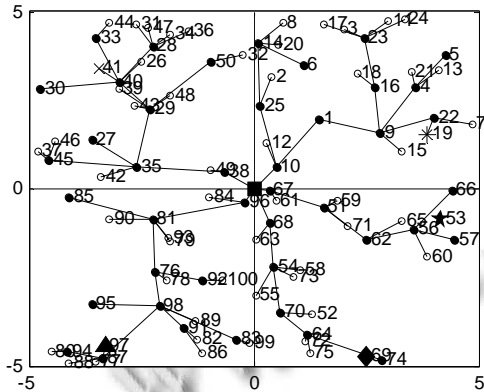


图 11 多种旋转节点情况下 A-TTI 拓扑推测结果

图 10 和图 11 表示当网络中存在多种不稳定度的情况下的 A-TTI 拓扑推测结果. 观察图 10 发现图中第不稳定度的旋转节点作为簇内节点或者单独成簇, 而高不稳定度的节点则被排除在了拓扑之外. 但是用特殊的标记提示系统维护人员网络可能存在故障的位置能够有效缩短网络故障排除时间, 不但提高系统拓扑准确性也增加了系统的可靠性.

通过分析易得 A-TTI 拓扑推测算法对现有的拓扑推测算法的优化即对旋转节点的处理有效提高了系统拓扑推测的准确性. 并且使得优化后的拓扑推测算法生成的网络拓扑结构更加完整、稳定, 而且可以大大提高拓扑生成率.

### 4 结语

智能电网的建设为电力线通信系统的发展带来了新的机遇. 而拓扑推测作为智能电网实现网络实时监控高效通信的基础尤为重要. 现有拓扑推测算法能够有效推测出正常情况下的 PLC 通信物理拓扑. 然而当网络中存在旋转节点时, 则会导致结果不准确, 甚至会造成局部拓扑的丢失. A-TTI 拓扑推测算法通过区分旋转节点的不稳定度并引入簇内分级机制对旋转节点进行处理. A-TTI 拓扑推测算法的准确性和较高的拓扑生成率, 满足了智能电网对 PLC 通信系统的稳定性和可靠性的要求.

### 参考文献

- Galli S, Lys T. Next generation narrowband (under 500 kHz) power line communications(PLC) standards. China Communications, 2015, 12(3): 1-8.
- Shao D, Wang Q, Lu Y, et al. Analyses and modeling of power line channel attenuation characteristics for low voltage access network in China. IEEE Vehicular Technology Conference. Vancouver. IEEE. 2014. 1-5.
- 宋其涛.基于蚁群算法的电力线载波通信组网研究[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- 刘晓胜,周岩,戚佳金.电力线载波通信的自动路由方法研究.中国电机工程学报,2006,26(21):76-81.
- 戚佳金,徐殿国,周岩,刘晓胜.低压电力线通信网络特性模型与组网算法.中国电机工程学报,2009,29(16):56-62.
- 戚佳金,刘晓胜,徐殿国,李琰,牟英峰.低压电力线通信分簇路由算法及网络重构.中国电机工程学报,2008,28(4): 65-71.
- Galijasevic Z, Abur A. Fault location using voltage measurements. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(2): 441-445
- Lampe L, Ahmed MO. Power grid topology inference using power line communications. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Vancouver. IEEE. 2013. 336-341.
- Ahmed MO, Lampe L. Power line network topology inference using frequency domain reflectometry. IEEE International Conference on Communications. Ottawa. IEEE. 2012. 3419-3423.