DOI: 10.7500/AEPS20240112003

基于动态图投影的大规模复杂配电网故障快速溯源方法

张煜佳[1]，袁 野[1]，周苏洋[2]，朱 红[3]，周爱华[4]，陈清泉[5]

(1. 江苏大学电气信息工程学院，江苏省镇江市 212013；2. 东南大学电气工程学院，江苏省南京市 210096；
3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司，江苏省南京市 210019；
4. 国网智能电网研究院有限公司，北京市 102209；5. 香港理工大学工程学院，香港 999077)

摘要：随着配电网规模的快速增长及分布式资源的高度渗透，配电网拓扑结构日益复杂，给配电网故障定位分析带来极大挑战。矩阵算法和智能优化算法应用于故障定位时需要根据变化的拓扑信息构造网络矩阵或建立寻优模型，极大增加了计算量和计算复杂度，数据处理和计算效率低下。文中首先构建了配电网拓扑的图数据模型，通过图投影技术从全景电网图中抽取适配故障溯源任务场景的优化子图；在此基础上，采用Yen最短路径搜索算法，查找电源至异常节点的潜在故障路径，通过遍历线路节点判断电流越限信息确定故障所在区段。所提方法解决了电网拓扑的精确表征和快速搜索问题，实现了面向大规模复杂配电网的故障源快速精准定位，在保证故障溯源准确性的基础上提升了故障搜索效率。

关键词：配电网；故障溯源；故障定位；图数据；图投影；图搜索；Neo4j

0 引言

配电网是面向广大用户的末端环节，承担着可靠连续供电的重任，当发生故障时，快速准确定位故障源头、隔离故障区段、恢复非故障区域供电是降低配电网故障停电影响的有效手段[1]，对提高配电网运行管理水平和供电可靠性至关重要。配电网柱上开关处安装配电馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)。正常运行时，FTU采集开关运行工况上传至配电自动化中心；发生故障时，各FTU将故障前及故障时的相关信息上传到控制中心，经计算机软件分析，将故障快速定位至两个相邻的分段开关之间，以遥控方式将故障区隔离，并恢复对非故障区的供电[2]。

配电自动化故障定位法主要分为两类：矩阵法和人工智能法。矩阵法根据网络拓扑和过流信息分别构造网络描述矩阵和故障信息矩阵，通过一定运算并结合故障判据准则，实现故障区段定位[3-5]。多年来，国内外学者针对传统矩阵算法适用范围小、容错性差等问题开展广泛研究。文献[6]提出网络关系矩阵概念，通过改进矩阵算法将其适用范围推广到多电源配电网的多重故障。文献[7]提出一种基于图论的矩阵定位算法，通过简单的矩阵运算即可定位故障区段，但当节点信息畸变时，仅剔除畸变节点使得故障区域扩大。文献[8]在矩阵算法的基础上提出一种基于FTU遥测信息的畸变信息校正策略，根据校正后的故障信息定位真实区段，一定程度上提升了算法的容错性。

人工智能法通过挖掘历史数据中的潜在规律，经训练后可实现快速准确决策[9]，文献[10-13]建立适用于配电网故障诊断的数学模型，模拟自然选择和遗传机制搜寻最优解，从而实现故障区段定位。文献[14-16]基于人脑的信息传递建立神经元模型，利用神经网络算法较强的自学习能力、非线性映射能力和容错能力对全局故障定位。此外，人工智能算法还包括免疫算法[17-19]、粗糙集理论[20-21]、仿电磁学[22]等。尽管在定位策略和算法上有所不同，但其基本思想都是建立有效反映配电网拓扑信息的0-1整数模型，通过优化算法寻找使目标函数最小的最优解，将故障定位问题转化为全局寻优问题进行求解，可适应网络结构改变，避免FTU信息缺失或畸变导致的故障错判和漏判。

然而，随着配电网规模日益扩大，网架结构愈加复杂，特别是分布式电源大规模接入给配电系统带来更多的不确定性和随机性[23-24]，给配电网故障定位分析带来极大挑战。矩阵算法和智能优化算法需

收稿日期：2024-01-12；修回日期：2024-12-24。
上网日期：XXXX-XX-XX。
国家自然科学基金资助项目(52177076)；国家重点研发计划资助项目(2022YFB2404200)。

要根据海量的配电网时变拓扑信息构造网络矩阵或建立寻优模型，大大增加了计算量和计算复杂度，数据处理和计算效率低下，难以满足配电网故障快速定位的需求。另外，随着拓扑规模增大，智能优化算法求解时间并非线性增长，搜索空间的进一步扩大，加剧了算法陷入局部最优解的可能，故障定位的准确性难以保证。

近年来，图数据库与图计算在电力系统中的应用逐渐兴起，在提升电网数据管理效率、加快大规模潮流计算求解速度等方面发挥重要作用[25]，为配电网故障快速定位提供新的解决方案。本文利用图数据节点-边结构优势和图计算并行优势，研究大规模复杂配电网拓扑的精确表征和快速搜索方法，通过遍历线路节点判断电流越限信息，实现故障源所在区段的快速准确定位。

1　大规模复杂配电网故障快速溯源策略

配电网发生短路故障或接地故障时，除小电流接地系统的单相接地故障外，其他故障类型一般具有明显的电流特征。当线路中过电流超出阈值，配电系统中装设的保护装置立即或延时动作，切断电路以防止故障扩散和损坏设备，此时供电线路下游出现失电情况。故障溯源即由失电的异常节点向线路上游搜索，根据量测装置采集的节点故障信息判断故障点所在区段，因而配电网故障溯源工作本质上是配电网拓扑的识别和搜索，在此基础上结合节点过电流判定实现故障点准确定位。

在大规模复杂配电网场景下，复杂的网络拓扑、多种电源和负荷类型，以及多样的运行状态使得配电网结构复杂度提升。同时，来自大量传感器和智能设备的实时数据流，以及历史数据和故障记录，导致系统数据规模庞大。在面对频繁变化的配电网结构和海量的多维异构数据时，如何避免传统方法反复构造网络矩阵或建立寻优模型导致的巨大冗余计算量成为提升配电网故障溯源效率的关键问题。

为此，本文提出了针对大规模复杂配电网的故障快速溯源策略，算法流程如图1所示。首先，基于公共信息模型(common information model，CIM)标准构建配电网拓扑的优化图数据模型，将开关设备抽象为边，建立开关连接关系，降低数据间多表结构的关联复杂性，极大提升拓扑搜索效率。其次，利用图数据库Neo4j进行配电网全景图创建。在此基础上，提出了基于动态图投影的大规模复杂配电网故障快速溯源方法，通过图投影技术在全景电网图中抽取故障相关子图，缩小故障搜索范围；以配电网中存在开关异动、失电等异常情况的节点为起始点向供电上游搜索，利用Yen最短路径算法确定电源点至异常节点的潜在故障路径，遍历其中节点并根据节点过流信息判断故障源所在区段，在保证故障查找准确性的基础上极大提升了故障溯源速度。

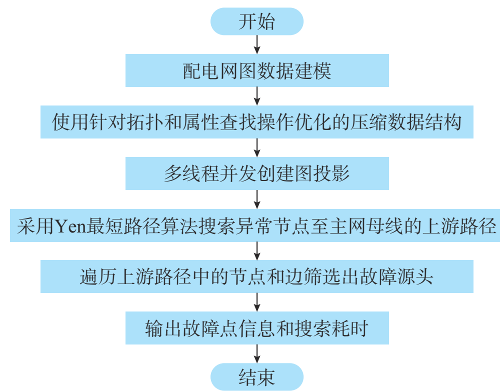


图1　基于动态图投影和图搜索的故障溯源算法流程
Fig. 1　Flow chart of fault back-tracing algorithm based on dynamic graph projection and graph search

2　基于配电网拓扑的图数据建模

随着电力系统复杂性和数据规模的快速增长，传统关系型数据库对大量配电网关联表结构的存储及查询效率已达到瓶颈。相比之下，图数据库和图计算技术在处理海量关联性数据和实时分析方面显示出潜在优势。将配电网中的电源与负荷作为节点、输电线路和联络线作为边存储于图数据库中，这种节点-边的数据结构能够更加灵活地表达复杂的电网拓扑结构。相比于邻接矩阵表示的配电网，在图计算的顶点并行计算模式下，配电网图模型中节点和边可作为独立的存储单元和计算单元，具有描述能力强、计算效率高等优点。关系型数据库和图数据库数据存储形式对比如图2所示。

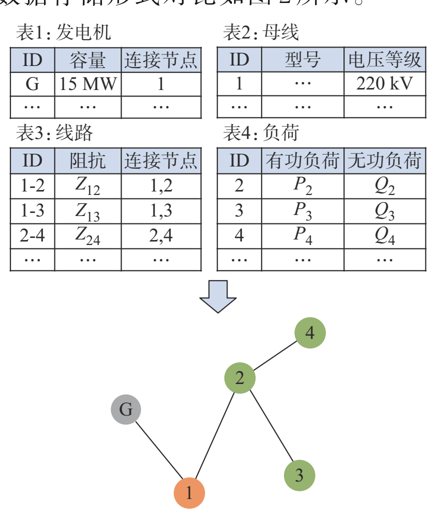
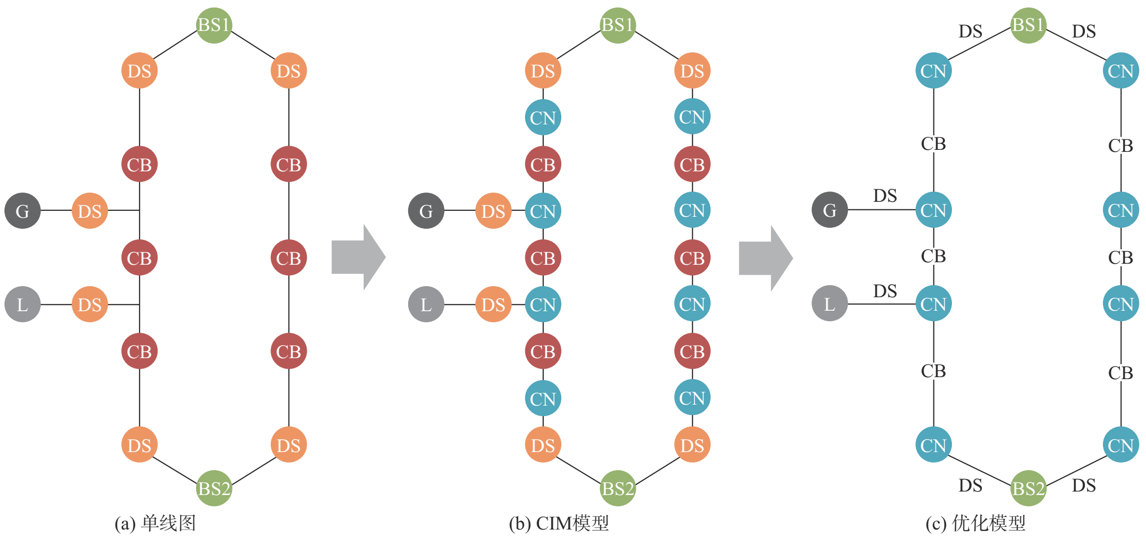


图2　关系型数据库和图数据库数据存储形式对比
Fig. 2　Comparison of data storage forms between relational databases and graph databases

2.1　配电网图数据模型优化设计

配电网图数据模型设计需要充分考虑到配电网中各类实体间的连接关系,变压器、负荷等各种设备的运行状态信息,并对节点和边的属性进行合理设置,以满足快速搜索和实时计算分析的应用要求。因此,本文基于IEC 61970标准定义的CIM[26]设计配电网开关边优化模型:1)将电力系统中的每个设备对象作为图数据库中的一个节点,对于资源类型、基准电压等非设备对象,将其作为节点属性而非新的节点;2)根据节点与节点之间的关系定义边的类型,除了CIM中的继承、关联、聚集3种关系,另外将隔离开关、断路器模拟为边,即建立开关连接关系;3)将虚拟的终端节点删除,直接连接到终端所属的设备上;4)保留连接节点,它作为在实体对象中不存在的虚拟节点,可将不同设备终端通过零阻抗连接起来,表示的是电网的动态拓扑,用于描述电网全局信息。配电网开关边优化图模型设计如图3所示。



BS:母线;DS:隔离开关;CB:断路器;L:负荷;G:发电机;CN:连接节点。

图3　配电网开关边优化图模型设计

Fig. 3　Design of an optimized graph model for switch edges in distribution networks

相较CIM,本文所提出的优化模型在计算效率和数据管理灵活性方面具有显著优势。表1为图数据模型优化结果。

表1　图数据模型优化结果

Table 1　Optimization results of graph data model

模型名称	节点总数/个	边总数/条	NTP执行时间/ms
传统CIM直接转换图数据模型	78 411	75 277	150
本文优化后的图数据模型	48 118	44 984	100

将具有开关状态的断路器、隔离器等开关设备抽象为边,连接两个节点,并保存开关的标识信息和开闭状态,而其他设备对象作为节点,相比于将所有设备和连接点作为节点,可大大减少顶点集和边集,简化拓扑搜索步骤。每个开关边的两端均与连接节点相连,边的类型为对应开关设备的类型,边上的属性包括开关的唯一标识信息、开闭状态信息、开关名称、开关上次断开时间等信息。相比将开关设备作为节点,优化后遍历搜索图中某一节点的效率可提升约30%。另外,存储于图数据库中的配电网模型在添加和删除节点、边时可以直接修改节点、边属性,避免重新构建网络矩阵,减少计算的复杂性,大大提升数据管理和系统维护的灵活性。

2.2　配电网拓扑数据建模过程

在完成模型设计后,利用图数据库工具Neo4j进行配电网全景图创建。通过内部接口获取某市全量的配电网单线图CIM/可扩展标记语言(extensible markup language,XML)文件作为源数据,根据CIM/XML数据源标准格式解析文件,并进行重复数据清洗、缺失数据补全操作。在此基础上,通过投影、关联等多种方式,将其转换为图数据模型对应的节点实体类对象和关系实体类对象(节点和边),并写入逗号分隔值(comma-separated values,CSV)文件,利用Neo4j-admin工具批量导入CSV文件,即可建立大规模配电网拓扑的图数据模型。某变电站10 kV馈线单线图在Neo4j中的建模结果见附录A图A1、A2。

值得说明的是,本文所提方法是一种基于图论

的通用性方法。图数据库作为一种具备原生图结构特性的高效工具,为本文所提方法提供了验证支持。

3 基于动态图投影和图搜索的故障溯源方法

深度优先搜索(depth-first search,DFS)和广度优先搜索(breadth-first search,BFS)是两种常用的图搜索算法,DFS按层次遍历图或树,从根节点开始,逐层向下搜索;BFS则采用先进先出的原则,从根节点开始,逐层向外扩展,它们可用于分析和搜索配电网的拓扑结构,以实现路径查找和故障定位。但是,在大规模配电网中,网络拓扑结构复杂、搜索空间过于庞大,DFS和BFS面临资源消耗巨大和算法效率低下的问题,并且DFS在搜索过程中极有可能陷入局部最优解而导致无法准确定位故障源或定位结果不稳定、不一致。BFS虽然可以找到最短路径,但在配电网中,故障点可能不在最短路径上,导致BFS无法有效识别所有潜在故障点。因此,本文提出了改进的图搜索算法,通过采用压缩数据结构并构建图投影,将拓扑搜索的范围从整个电网全景图缩小至与故障相关的子图,从而有效减少计算量和内存消耗;针对配电网子图,采用Yen最短路径算法搜索电源点至异常点的潜在故障路径,遍历线路节点并根据节点过流信息确定故障源所在区段,从而实现快速准确排查故障源。

3.1 基于图投影技术的配电网子图抽取方法

由于现代配电网呈现高度的动态性和复杂性,使得传统的基于固定电网拓扑和预定义故障模式的故障溯源方法变得不再适用。在这种背景下,图投影技术的出现和逐渐成熟为实现更加灵活和准确的大规模复杂配电网故障溯源提供了新的解决途径。

在配电网图数据建模的基础上,通过图的投影,可以从原始、包含大量不相关信息的全景电网图中,提取出仅与当前故障溯源任务相关的子图,有效去除大量不相关的节点和边,大大简化了故障分析过程,使得任务更加高效和精确。图投影技术可根据电网实际状态和需求进行投影,确保所得到的子图始终与实际电网状态一致,在应对电网的动态变化时具有明显优势。此外,由于图投影只关注与当前任务相关的部分,它可以很好地处理未知的故障模式,任意一个在原始图中有所体现的故障均能通过投影正确反映在子图中。

3.1.1 图投影的定义

图投影是一种对原始图进行简化或转化的技术。给定一个图$G(V,E)$,其中V为节点集合,E为边集合,图投影的目标是根据某些准则生成一个新的图$G'(V',E')$,其中节点子集$V'\subseteq V$,边子集$E'\subseteq E$。公式描述为:

$$G'=P(G) \tag{1}$$

式中:P为投影函数。

此外,引入节点和边的筛选函数。对于节点,定义一个筛选函数f_v: $V\rightarrow 0,1$,当节点v满足某一条件时,$f_v(v)=1$,否则为0,可以得到投影后的节点集合:

$$V'=\{v|v\in V,f_v(v)=1\} \tag{2}$$

同样,对于边定义一个筛选函数f_e: $E\rightarrow 0,1$,当边e满足某一条件时,$f_e(e)=1$,否则为0,可以得到投影后的边集合:

$$E'=\{e|e\in E,f_e(e)=1\} \tag{3}$$

在配电网模型中,可根据不同场景下的特定节点及其连接设备的类型、状态或其他属性来定义这些筛选函数。

3.1.2 图投影的方法

图的投影是从原始图中提取特定的子图,以便于高效查询和分析,这个过程涉及多个关键步骤,包括节点筛选、边筛选和属性简化。

1)节点筛选

在配电网故障溯源场景中,本文主要关注某些特定节点,如开关节点,则筛选函数可以定义为:

$$f_v(v)=\begin{cases}1 & v\text{为开关节点}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{4}$$

根据式(2)、式(4),得到只包含低压开关节点的投影子图节点集合。

2)边筛选

边筛选与节点筛选类似,但关注的是连接低压开关和母线之间的边,则定义筛选函数为:

$$f_e(e)=\begin{cases}1 & e\text{连接低压开关和母线}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{5}$$

根据式(3)、式(5),得到投影子图的边子集。

但在故障溯源场景下,边仅表示设备之间的拓扑连接关系,故不需要对边进行筛选投影。

3)属性筛选

在图数据库中,每个节点和边可能有多种属性,如电压等级、所属厂站等,为提升查询性能,对节点和边的属性进行简化,仅保留对故障溯源最关键的属性。当只考虑电网节点的开关状态和历史电流时,属性筛选函数f_a可定义为:

$$f_a(a)=\begin{cases}1 & \text{属性}a\text{是开关状态或历史电流}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

3.1.3　图投影在故障溯源场景下的应用

由于配电网规模庞大,传统的单线程图投影方法在处理海量节点与边数据时效率低下,难以满足故障溯源对实时性的要求。为此,本文引入多线程技术,利用现代多核处理器的并行计算能力,将子图提取任务划分为多个子任务,分配至不同线程并由多个CPU内核同时处理。该方法显著提升了图投影的构建效率,能够快速高效地锁定与故障溯源相关的节点与边,从而简化搜索流程,提升整体计算性能。

假设原图为$G(V,E)$,将节点集V和边集E分别划分为n个子集:$V=V_1\cup V_2\cup\cdots\cup V_n$和$E=E_1\cup E_2\cup\cdots\cup E_n$,其中$V_i$为节点子集,$E_i$为边子集,$i$为子集序号,$i=1,2,\cdots,n$,$n$为线程数量。根据图的拓扑结构(高压-中压-低压)将V和E分配给不同的线程,确保相关的节点和边被同一个线程处理,从而减少线程间的通信消耗。并行处理流程如下:

1)初始化:启动n个工作线程;

2)数据分配:根据所选的数据划分策略,将原图的节点和边分配给相应线程;

3)并行处理:每个线程单独处理其分配到的节点和边,根据预定义的筛选函数创建投影;

4)合并结果:将所有线程的结果合并为一个完整的投影图。

在故障溯源场景下应用多线程并发图投影技术具有诸多优势。首先,投影后的子图规模较小,相较原图而言,数据库查询和拓扑分析复杂度大大降低。具体来说,若原图$G(V,E)$经过投影得到$G'(V',E')$,其中$|V'|<|V|$且$|E'|<|E|$,$|\cdot|$为集合中元素个数,那么查询操作的时间复杂度可从$O(|V|+|E|)$降为$O(|V'|+|E'|)$。此外,通过图投影排除与任务无关的节点和边,可进一步提高分析效率并减少误判和漏判的可能性。

3.2　基于Yen算法的配电网拓扑搜索策略

Yen最短路径算法最早由Jin Y.Yen于1970年提出[27],是一种用于在给定图中识别起始节点与目标节点之间的多个最短路径的综合方法。该算法借鉴了Dijkstra最短路径算法的优点,同时引入发现备选路径的机制,能够提供从电源点到异常节点的多条可能的供电路径,为故障的快速准确溯源提供了有力支撑。

3.2.1　最短路径的定义和计算方法

最短路径是指在加权图中从源节点到目标节点的一条路径,这条路径上的权重之和最小。对于电网模型,这些权重代表各种物理或经济参数,例如线路长度、传输成本、电阻大小等。在故障溯源这一特定场景下,由于图的边代表设备之间的拓扑连接结构,任意两个节点之间边的权重视为相等。对于最短路径问题,Dijkstra算法是求解单源最短路径问题的经典方法。

Dijkstra算法步骤如下:

1)创建两个集合:已确定最短路径的节点集合S和未确定最短路径的节点集合Q,初始时集S中只有源节点s,其他节点放入集合Q;

2)创建数组dis:保存源节点s到各顶点的最短路径值;将dis[s]设为0,对于s的邻接节点m,将dis[m]设为s到m的距离edge(s,m),dis[其他节点]设为无穷大;

3)当集合Q不为空时:

(1)从dis数组选择最小值,对应节点u,该值为源点s到节点u的最短路径;

(2)将u添加到S中,并从Q中移除u;

(3)对于节点u的所有邻接节点v,如果dis[u]+edge(u,v)的值小于dis[v],则更新邻接节点v的最短路径值,并记录前驱节点。

3.2.2　Yen算法的核心思想和流程

Yen算法是一种寻找给定图中两个节点间的K条最短路径的算法,其基本思想是首先利用Dijkstra算法找到最短路径,然后尝试去除路径上的一个节点或一条边,再次寻找从源到目标的最短路径。这些新的路径将被纳入备选路径。通过重复这个过程,可以获得K条最短的路径。在配电网故障溯源场景中,电源点与下游失电异常节点之间可能存在一条或多条供电路径。若在主要供电路径中未能定位故障区段,则故障可能来自其他路径,此时需对其他供电路径进行进一步排查以确定故障位置。Yen算法可以用于查找这些备选路径,以帮助识别故障区段,提高系统可靠性和故障溯源效率。

Yen算法的目标是在带权图$G(V,E)$中为给定的源节点s和目标节点t寻找K条最短路径。这些路径被定义为从s到t的不重复的最短路径。

1)初始设定

设定A为已确定的最短路径集合,B为候选路径集合。首先,使用Dijkstra最短路径算法找到从s到t的最短路径P_1。

$$\begin{cases}A=\{P_1\}\\B=\varnothing\end{cases}\tag{7}$$

2)主循环

为了找到K条最短路径,对每一条已知路径$P_i\in A$,i为路径序号,执行以下步骤,直至A中有K

条路径或 B 为空：

对于 P_i 中的每一个节点 v_j，j 为节点序号(除了源节点和目标节点)：

(1)将连接到 v_j 的所有边暂时从图 G 中移除；

(2)计算从源节点 s 到目标节点 t 在新图中的最短路径，记为 $P_{i,j}$；

(3)将之前移除的边恢复到图 G 中；

(4)将新路径 $P_{i,j}$ 加入到候选路径集合 B。

在 B 中选择一条最短路径 $P_{\min}$(如果存在)，将其移出 B 并加入 A，公式描述为：

$$\begin{cases} P_{\min}=\min(B) \\ B=B-\{P_{\min}\} \\ A=A\cup\{P_{\min}\} \end{cases} \tag{8}$$

3)候选路径生成

每次根据 A 中已知路径产生新的候选路径时，都是基于暂时移除 P_i 中某一节点后的图 G 计算的，这确保了新的候选路径 $P_{i,j}$ 与 P_i 不同。

$$B=B\cup\{P_{i,j}\} \tag{9}$$

3.2.3 Yen算法在故障溯源场景下的应用

配电系统通常具有复杂的拓扑结构和庞大的数据规模，且各节点可能存在不同的运行状态与参数配置，使得传统的搜索策略(例如深度优先搜索和广度优先搜索)在部分场景下效率低下或准确性不足。为此，本文引入Yen算法实现多路径识别机制，当主路径未能定位故障区段时，备选路径可作为补充路径用于进一步排查，从而提高故障定位的完整性。此外，不同路径在故障传播中具有不同的重要性与影响范围，Yen算法可输出从源节点到失电节点的 K 条最短路径，并结合路径长度、关键设备覆盖度等指标对其进行综合评估与排序，从而确定分析的优先级。由于电气故障常沿最短路径或最低阻抗路径传播，Yen算法提供的近似最短路径集合具有高度工程相关性。该方法不仅增强了配电网故障溯源策略的灵活性，还显著提升了故障诊断的效率与准确性，有助于保障复杂配电系统的运行可靠性与稳定性。

3.3 基于节点遍历的配电网故障溯源方法

通过子图抽取和路径搜索，可将故障源所在范围进一步缩小至一条或多条潜在的故障线路。考虑到短路或接地故障的情况下，过电流存在于电源点到故障点之间，以异常节点为起始点，沿潜在供电线路向上游依次访问路径中的每个节点，查询节点的电流信息，将故障发生后的实时电流值与正常运行的基准值进行比对，如式(10)所示。

$$I_i \geqslant I_{i,\mathrm{set}} \tag{10}$$

式中：I_i 为节点 i 在故障发生后的实时电流；$I_{i,\mathrm{set}}$ 为根据正常运行下系统状态设定的节点电流阈值。式(10)满足则认为节点 i 有故障电流流过。

以单电源故障为例，若节点 i 沿上游路径至电源的所有节点均有故障过流，而与之相连的下游节点均无过流，则判断故障位于节点 i 与下游第1个节点 j 之间。图4示例中，为判断故障点所在区段，依次查询节点 A 至 H 电流，根据式(10)判断节点 A、B、C、D、G 有故障过流，节点 E、F、H 无过流，结合实际供电路径即可定位故障点于区段 GH，故障过流路径即为红色虚线所示。

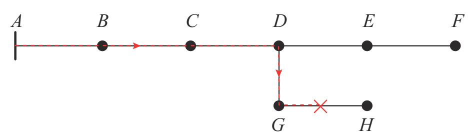


图4 单电源线路故障溯源示例

Fig. 4 Example of fault tracingfor a single-source distribution line

与传统矩阵法或智能优化算法相比，基于路径搜索与节点遍历的配电网故障溯源方法能够直接利用网络拓扑结构进行高效排查，原理简明，实用性强。该方法无需重复构造网络矩阵或建立复杂的优化模型，显著降低了计算复杂度，具备良好的适应性，尤其适用于结构复杂、规模庞大的配电系统。此外，通过结合节点遍历与实时状态信息，可精确定位故障区段，避免因搜索空间受限而陷入局部最优，从而有效提升溯源准确性。即使在FTU覆盖不全、部分拓扑信息缺失的情况下，也可通过适当扩大搜索范围，在一定程度上获得更接近真实情况的故障识别结果。

4 算例验证

4.1 策略验证

算例采用中国江苏某地3个110 kV变电站、100条10 kV馈线构成的配电网，系统包含配变、断路器、联络开关等10万设备节点，以及10万条表示连接关系的边。以其中某变电站10 kV馈线单线图作为待测试的故障线路(见附录A图A1)，线路中包含109个节点和268条边。设置故障点如图5所示，位于201号开关节点和2号母线节点之间，故障类型为相间短路故障，则受故障影响线路下游失电，设定异常信号节点为202号开关节点。

在图数据库中根据节点属性创建图投影，过滤出与异常信号节点具有相同feeder_id属性(表示它们在同一个单线图中)的所有设备节点，将这些节点作为图投影的数据源，即可从全景图中确定所选的待测试单线图；利用Yen算法在该单线图中搜索异

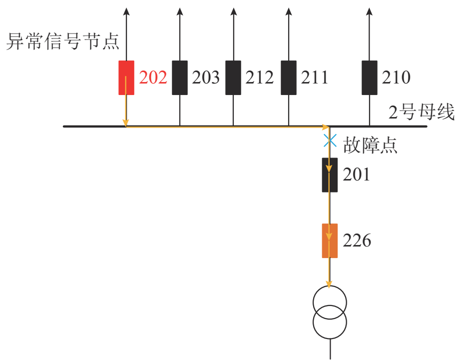


图5　待测试线路故障场景设置
Fig. 5　Fault scenario settings for the test line

常节点至电源的供电路径，如图5中黄色箭头所示，路径上的设备节点组成潜在的故障设备列表。

遍历路径中的节点并根据节点过流信息可准确判断出故障源所在区段，算法输出包括故障设备节点名称、类型及其所属馈线编号等信息，见附录A图A3，算法总体耗时19 ms，算例结果验证了本文所提故障溯源策略的可行性。

4.2　性能对比

4.2.1　构造关联关系矩阵性能对比

在利用传统矩阵方法和人工智能算法对电网拓扑进行分析时，需要构建关联矩阵作为表示电网设备连接关系的数据结构。电网数据规模庞大、信息变化频繁，导致关联关系矩阵维度过于庞大，采用传统关系型数据库构造及处理关联矩阵，需要将各设备表中表示连接点号的字段与表名进行映射，遍历每个表执行对应连接点号的关联查询，递归搜索新的邻接设备，直至发现不属于当前馈线的设备，耗费大量的时间、内存和计算资源，难以满足电网拓扑分析的实时性需求。相比之下，图数据库提供更为直观、高效和灵活的数据模型，能够适应电网拓扑的复杂性和动态性。在图数据库的处理中，通过多线程并发创建子图投影，将图数据库中的数据投射到优化内存图上，在此基础上利用最小施泰纳树算法抽取相关设备并构造关联矩阵。因此，为验证图数据库在大规模数据处理效率方面的优势，算例首先对比了图数据库和关系型数据库在抽取特定线路数据构造关联矩阵的性能差异。

图数据库和关系型数据库构建关联关系矩阵耗时对比结果如表2所示。关系型数据库在抽取子图时耗时699.05 ms；而图数据库耗时仅为26 ms，在进一步使用图投影和最小施泰纳树算法进行优化后耗时缩短至14 ms。因此，相较于关系型数据库，图数据库可实现更快速、高效的数据提取和矩阵构建。

4.2.2　故障溯源性能对比

其次，为验证本文所提图搜索算法较一般优化

表2　两种数据库构建关联关系矩阵耗时对比
Table 2　Comparison of time consumption for constructing correlation matrices using two databases

数据库	节点规模	耗时/ms
关系型数据库MySQL	1 222 205(120万设备节点)	699.05
Neo4j图数据库	105 183(10万设备节点)	26
Neo4j图数据库(优化)	105 183(10万设备节点)	14

求解算法在速度和准确性方面的优势，针对设置的测试线路开展算例对比分析。优化算法在构造关联矩阵基础上，调用免疫算法进行求解。另外，为保证算例结果具有参考性，可改变故障点设置进行多次求解，计算求解平均耗时和准确性。结果对比如下：1)免疫算法平均耗时581.53 ms，包括构造矩阵时间533.52 ms和算法求解时间48.01 ms，改变故障点位置多次求解准确率为100%；2)本文算法平均耗时15 ms，包括路径搜索时间5 ms和遍历节点定位故障时间10 ms，改变故障点位置多次搜索准确率为100%。

由测试结果可知，仅对比执行故障溯源任务的时间，而不考虑构造矩阵和搜索上游路径耗时，两种算法所需时间相差并不大。考虑到单张单线图中设备数量有限，难以充分体现算法性能差异，本文以所选单线图为中心，依次向其物理连接的邻近单线图进行拼接，构建更大规模的线路作为测试线路，并在此基础上重复执行故障溯源任务，结果见表3和表4。

表3　免疫算法故障溯源耗时
Table 3　Time consumption of immune algorithm for fault back-tracing

拼接子图数	节点数	边数	构造矩阵耗时/ms	算法求解耗时/ms	累计耗时/ms
1	109	268	533.52	48.01	581.53
2	275	841	1 350.62	75.00	1 425.62
3	402	1 116	2 245.17	134.97	2 380.14
4	817	2 165	4 227.03	547.96	4 774.98
5	1 016	2 524	5 805.40	916.13	6 721.53
6	1 192	2 878	6 612.47	1 539.15	8 151.62
7	1 380	3 298	6 439.54	2 395.11	8 834.65
8	1 757	4 337	8 595.10	4 125.50	12 720.61
9	2 148	5 179	10 671.02	5 684.09	16 355.10
10	2 423	5 955	14 236.04	7 375.06	21 611.10

本文基于图数据库和图搜索的方法，可实现配电网拓扑的直接搜索，不需要额外构建关联关系矩阵，即避免了因配网系统拓扑结构及运行信息动态变化导致工作量剧增问题。此外，故障溯源重点在于搜索电源节点至异常节点间的潜在供电路径，从

表4　图搜索算法故障溯源耗时
Table 4　Time consumption of graph search algorithm for fault back-tracing

测试编号	搜索路径耗时/ms	遍历节点定位故障耗时/ms	累计耗时/ms
1	5	10	15
2	3	13	17
3	4	11	16

单个节点开始搜索时，图投影中搜索分支的数量级及路径上节点的数量级均相对固定，且故障搜索限定在与故障相关的子图局部范围内。比较免疫算法和图搜索算法实现故障溯源的累计耗时，如图6所示，图中纵坐标为对数刻度。由图可见，免疫算法所耗费的时间远超图搜索算法，且随着设备数量的增加呈现指数增长趋势，而图搜索算法耗时极短，基本稳定在16 ms左右，随着子图拼接数增加，两者差距愈加显著。

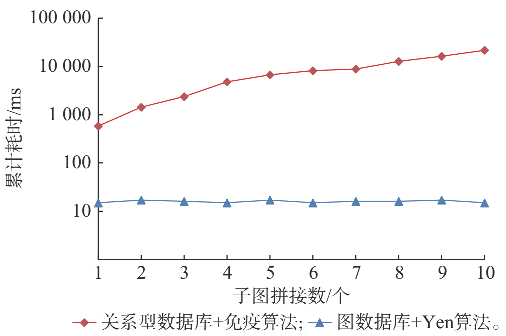


图6　两种故障溯源方法累计耗时
Fig. 6　Cumulative time consumption of two fault back-tracing methods

在准确性方面，随着线路规模扩大，免疫算法出现求解失败或结果出错的情况，无法保证故障溯源结果的准确性，而图搜索方法通过路径搜索和节点遍历，结合实际电流状态信息，可以全面、精确、动态地定位配电网中的故障区段。因此，测试结果验证了本文所提方法的优越性，相较以往基于关系型数据库的智能优化算法，本文所提方法在保证故障源查找准确性的基础上，极大提升了故障搜索效率，更加适用于拓扑结构复杂、数据规模庞大的大型配电网系统。

5　结语

本文提出了一种基于图结构和图搜索的配电网故障溯源方法，在构建配电网图数据模型的基础上，采用数据压缩技术和图投影技术，从原始的、包含大量不相关信息的全景电网图中抽取适配任务场景的优化子图，简化故障溯源过程，并采用Yen最短路径算法查找电源到异常节点的潜在供电路径，通过遍历路径节点结合实际电流状态信息判断故障源所在区段，在保证故障溯源查找准确性的基础上大幅提升故障溯源速度。本文的主要研究成果如下：

1）基于CIM模型对配电网进行图数据优化建模，通过将开关设备抽象为边，优化系统拓扑连接关系，显著减少数据间复杂的多表结构关联，有效提升拓扑搜索效率约30%。

2）提出了基于动态图投影的大规模复杂配电网故障快速溯源方法，通过搜索和遍历潜在故障路径，结合节点状态信息实现故障源区段的快速准确定位。相较免疫算法求解，在保证结果准确性的基础上，节省了用于构造关联关系矩阵的91.7%的时间消耗，单张线路图的情况下，故障搜索效率提升97.4%，大规模复杂配网下，故障搜索耗时稳定在16 ms左右。

本文所提方法仅适用于大电流系统发生短路或接地故障的情况，对于小电流系统单相接地故障，由于接地电流很小，无须立即切除故障，系统可以继续运行1～2 h，这种情况下的故障溯源需要另行分析。此外，本文方法依赖于数据的完整性和准确性，在信息缺失/畸变情况下得到的故障搜索结果存在范围较大、不够精确的问题。在下一步工作中，考虑引入电网的具体参数，如电阻、电抗等，实现电流路径的精确模拟，这将使Yen算法能够综合考虑物理距离和电流实际流动情况，从而适应多场景、多重故障影响，有效提升算法的实用性，提供更准确的故障溯源结果。

本文样本及结果数据已共享，可在本刊网站下载（http://www.aepsinfo.com/aeps/article/abstract/20240112003）。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx），扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] GURURAJAPATHY S S, MOKHLIS H, ILLIAS H A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 949-958.

[2] TAN Z H, GE L, KANG T L, et al. An accurate fault location method of smart distribution network[C]// 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), September 23-26, 2014, Shenzhen, China: 916-920.

[3] 刘健，倪建立，杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化，1999，23(1)：31.

LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31.
[4] 王飞,孙莹.配电网故障定位的改进矩阵算法[J].电力系统自动化,2003,27(24):45-46.
WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-46.
[5] 梅念,石东源,杨增力,等.一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J].电力系统自动化,2007,31(10):66-70.
MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
[6] 黄佳乐,杨冠鲁.配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.
HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
[7] 胡福年,孙守娟.基于图论的矩阵算法在配电网故障定位中的应用[J].中国电力,2016,49(3):94-98.
HU Funian, SUN Shoujuan. Fault location of distribution network by applying matrix algorithm based on graph theory[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 94-98.
[8] 郑涛,马龙,李博文.基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位[J].电网技术,2021,45(10):3926-3934.
ZHENG Tao, MA Long, LI Bowen. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3926-3934.
[9] 王小君,窦嘉铭,刘曌,等.可解释人工智能在电力系统中的应用综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(4):169-191.
WANG Xiaojun, DOU Jiaming, LIU Zhao, et al. Review and prospect of explainable artificial intelligence and its application in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 169-191.
[10] 杜红卫,孙雅明,刘弘靖,等.基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J].电网技术,2000,24(5):52-55.
DU Hongwei, SUN Yaming, LIU Hongjing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
[11] 卫志农,何桦,郑玉平.配电网故障区间定位的高级遗传算法[J].中国电机工程学报,2002,22(4):128-131.
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 128-131.
[12] 刘鹏程,李新利.基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J].电力系统保护与控制,2016,44(2):36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
[13] 颜景斌,夏赛,王飞,等.基于改进遗传算法的有源配电网故障定位分析[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(6):107-112.
YAN Jingbin, XIA Sai, WANG Fei, et al. Analysis of fault location for active distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 107-112.
[14] YU Yang, LI Mengshi, Ji Tianyao, et al. Fault location in distribution system using convolutional neural network based on domain transformation [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(3): 472-484.
[15] ALI BUKHARI S B, KIM C H, MEHMOOD K K, et al. Convolutional neural network-based intelligent protection strategy for microgrids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(7): 1177-1185.
[16] 戴志辉,耿宏贤,韩健硕,等.基于矩阵算法和BP神经网络的智能站二次系统故障定位方法[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(6):1-10.
DAI Zhihui, GENG Hongxian, HAN Jianshuo, et al. Fault location method of secondary system in smart substation based on matrix algorithm and BP neural network[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(6): 1-10.
[17] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等.基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
[18] 陈奎,张云,王洪寅,等.基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J].电力系统保护与控制,2017,45(24):57-62.
CHEN Kui, ZHANG Yun, WANG Hongyin, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 57-62.
[19] 高锋阳,李昭君,袁成,等.量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位[J].高电压技术,2021,47(2):396-406.
GAO Fengyang, LI Zhaojun, YUAN Cheng, et al. Fault location for active distribution network based on quantum computing and immune optimization algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 396-406.
[20] 束洪春,孙向飞,司大军.基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J].中国电机工程学报,2001,21(10):73-77.
SHU Hongchun, SUN Xiangfei, SI Dajun. A study of fault diagnosis in distribution line based on rough set theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 73-77.
[21] 车延博,郁舒雁,葛磊蛟.基于RS-IA数据挖掘的配电网故障定位模型[J].电力自动化设备,2017,37(5):122-128.
CHE Yanbo, YU Shuyan, GE Leijiao. Fault locating model based on RS-IA data mining for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 122-128.
[22] 郭壮志,吴杰康.配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J].中国电机工程学报,2010,30(13):34-40.
GUO Zhuangzhi, WU Jiekang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40.
[23] KUMAR R, SAXENA D. A literature review on methodologies of fault location in the distribution system with

distributed generation[J]. Energy Technology，2020，8(3)：1901093.

[24] 李鹏，余涛，李立涅，等. 电力人工智能的演变与展望——从专业智能走向通用智能[J]. 电力系统自动化，2024，48(16)：1-17.
LI Peng，YU Tao，LI Liying，et al. Evolution and outlook of power artificial intelligence-from specialized intelligence to general intelligence[J]. Power system automation，2024，48(16)：1-17.

[25] DAI R C，LIU G Y. Graph database and graph computing for power system analysis[M]. Hoboken，America：Wiley，2023.

[26] RAVIKUMAR G，KHAPARDE S A. A common information model oriented graph database framework for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2016，32(4)：2560-2569.

[27] YEN J Y. An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks[J]. Quarterly of Applied Mathematics，1970，27(4)：526-530.

张煜佳(1998—)，女，硕士研究生，主要研究方向：基于图论的配电网故障溯源与恢复。E-mail：13961126415@163.com

袁　野(1991—)，男，通信作者，博士，副教授，博士生导师，主要研究方向：磁悬浮电机系统创新设计与先进控制。E-mail：1000050003@ujs.edu.cn

周苏洋(1987—)，男，博士，副教授，博士生导师，主要研究方向：综合能源系统、人工智能、需求侧管理等。E-mail：suyang.zhou@seu.edu.cn

(编辑　代长振)

Fast Fault Back-tracing Method for Large-scale Complex Distribution Networks Based on Dynamic Graph Projection

ZHANG Yujia[1]，*YUAN Ye*[1]，*ZHOU Suyang*[2]，*ZHU Hong*[3]，*ZHOU Aihua*[4]，*CHEN Qingquan*[5]

(1. School of Electrical and Information Engineering，Jiangsu University，Zhenjiang 212013，China;
2. School of Electrical Engineering，Southeast University，Nanjing，210096，China;
3. Nanjing Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co.，Ltd.，Nanjing 210019，China;
4. State Grid Smart Grid Research Institute Co.，Ltd.，Beijing 102209，China;
5. Faculty of Engineering，The Hong Kong Polytechnic University，Hong Kong 999077，China)

Abstract: With the rapid expansion of distribution network scale and the high penetration of distributed resources，the increasing complexity of distribution network topology poses significant challenges to fault location analysis. Conventional matrix-based algorithms and intelligent optimization algorithms require dynamic reconstruction of network matrices or optimization models based on evolving topological information，leading to excessive computational burden and complexity，as well as inefficient data processing and computation. This paper first constructs a graph data model for distribution network topology. Through graph projection techniques，it extracts an optimized subgraph tailored to fault tracing task scenarios from the panoramic power grid graph. Building on this，the Yen shortest path search algorithm is employed to identify potential fault paths from the power source to abnormal nodes. By traversing line nodes and analyzing current violation information，the fault section is accurately identified. The proposed method addresses the challenges of precise topological representation and rapid searching in power grids，enabling fast and accurate fault location for large-scale complex distribution networks. While ensuring fault back-tracing accuracy，this method significantly enhances fault search efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52177076) and National Key R&D Program of China (No. 2022YFB2404200).

Key words: distribution network; fault back-tracing; fault location; graph data modeling; graph projection; graph search; Neo4j

附录A

表A1　配电网图模型的节点属性及数据类型

Table A1　Node attributes and data types of the distribution network graph model

属性编号	属性	数据类型	描述
1	mRID	String	示范机构颁发的主资源标识符
2	PSRID	String	电力系统资源ID唯一标识符
3	PowerSystemResourceID	String	电力系统资源ID唯一标识符
4	name	String	该名称是任何人可读的自由文本,并且可能是非唯一文本,用于命名该对象
5	aliasname	String	命名该资源对象的别名
6	PSRTypeCode	String	该资源对象属于的子类型的编码
7	PSRTypeName	String	该资源对象属于的子类型的名称
8	NormallyInService	Boolean	说明设备可用性,是否正常服务
9	BaseVoltageValue	String	该设备所属的基准电压的值
10	BaseVoltageName	String	该设备所属基准电压的单位名称
11	rateds	String	正常视在额定功率,该属性应为正值,对于双绕组变压器,高压侧和低压侧的值相同
12	vectorGroup	String	继电保护变压器矢量群。
13	phaseNumber	Long	运行的相数
14	customerCount	Long	该需求代表的个人客户数量
15	SSWLG	String	国家电网资源杆塔唯一标识
16	endNumber	Long	此变压器端的编号,对应于电源变压器矢量组中的端序或相角时钟编号,最高电压绕组应为1,电源变压器内的每一端都应具有唯一的后续端号,注意,变压器端号不需要与端子序号相匹配
17	r	String	变压器端电阻(星型),对于非等效变压器该属性应大于或等于零
18	x	String	变压器端正序串联电抗(星型)
19	g	String	磁化支电导
20	connectionKind	String	绕组连接类型

表A2　配电网图模型的节点类型及其属性

Table A2　Node types and their attributes of the distribution network

节点类型	属性编号																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ACLineSegment	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√										
ConductingEquipment	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√										
PowerTransformer	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√							
Equipment	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			√						
BusbarSection	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√										
PoleCode	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√					√					
CompositeSwitch	√	√	√	√	√	√	√	√												
Substation	√	√	√	√	√	√	√													
Feeder	√	√	√	√	√	√	√													
PowerTransformerEnd	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√					√	√	√	√	√
VoltageLevel	√			√					√	√										
ConnectivityNode	√			√																

表 A2　配电网图模型的边属性及数据类型

Table A2　Edge attributes and data types of the distribution network graph model

边类型	起止连接标识	
	:START_ID	:END_ID
CONNECT_WITH	导电设备 ConductiongEquipment 的 mRID	连接节点 ConnectivityNode 的 mRID
SWITCH_CONNECT	连接节点 ConnectivityNode 的 mRID	连接节点 ConnectivityNode 的 mRID
CONTAINED_IN	设备 Equipment 的 mRID	设备所属容器 EquipmentContainer 的 mRID
VOLTAGELEVEL_IN	电压等级 VoltageLevel 的 mRID	厂站 Substation 的 mRID
EBERGIZED_BY	变压器端口 PowerTransformerEnd 的 mRID	变压器 PowerTransformer 的 mRID
TRANSFORMEREBD_IN	馈线 Feeder 或厂站 Substation 的 mRID	给馈线正常提供能量的厂站 Substation 或给厂站正常提供能量的馈线 Feeder 的 mRID

边类型	开关边属性及数据类型		
	属性	数据类型	描述
SWITCH_CONNECT	mRID	String	示范机构颁发的主资源标识符
	PSRID	String	电力系统资源 ID 唯一标识符
	PowerSystemResourceID	String	电力系统资源 ID 唯一标识符
	name	String	该名称是任何人可读的自由文本，并且可能是非唯一文本，用于命名该对象
	open	Boolean	开关当前开闭状态
	normalOpen	Boolean	开关在正常运行时的开闭状态
	compositeSwitchMRID	String	开关所属组合开关的 mRID
	equipmentContainerMRID	String	开关所述设备容器的 mRID
	switchTypeName	String	所属开关类型的名称

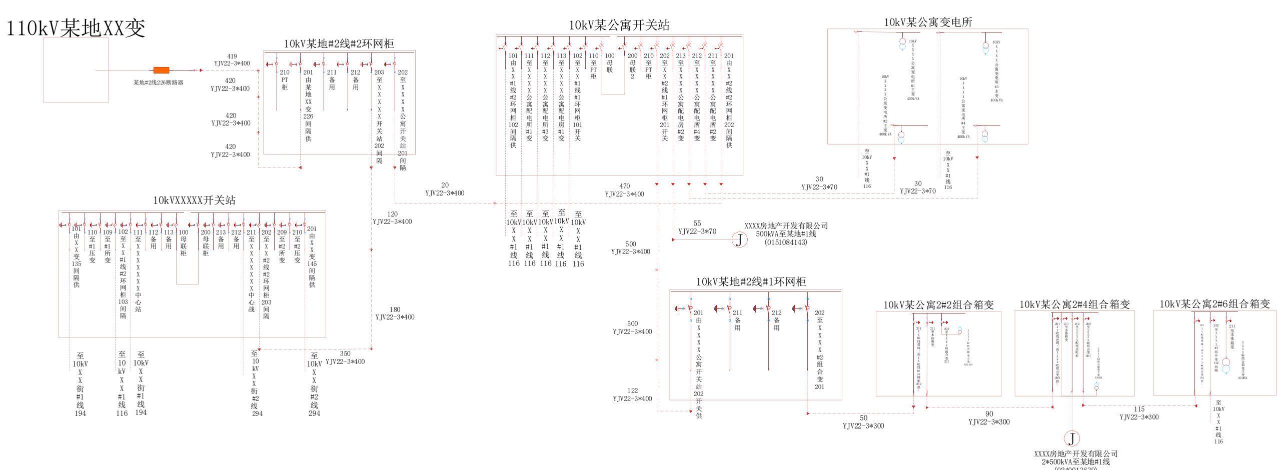


图 A1　某地 xx 变/10 kV #2 线 226 单线图

Fig. A1　Single-line diagram for line #2, 226 at xx substation/10 kV in a certain location

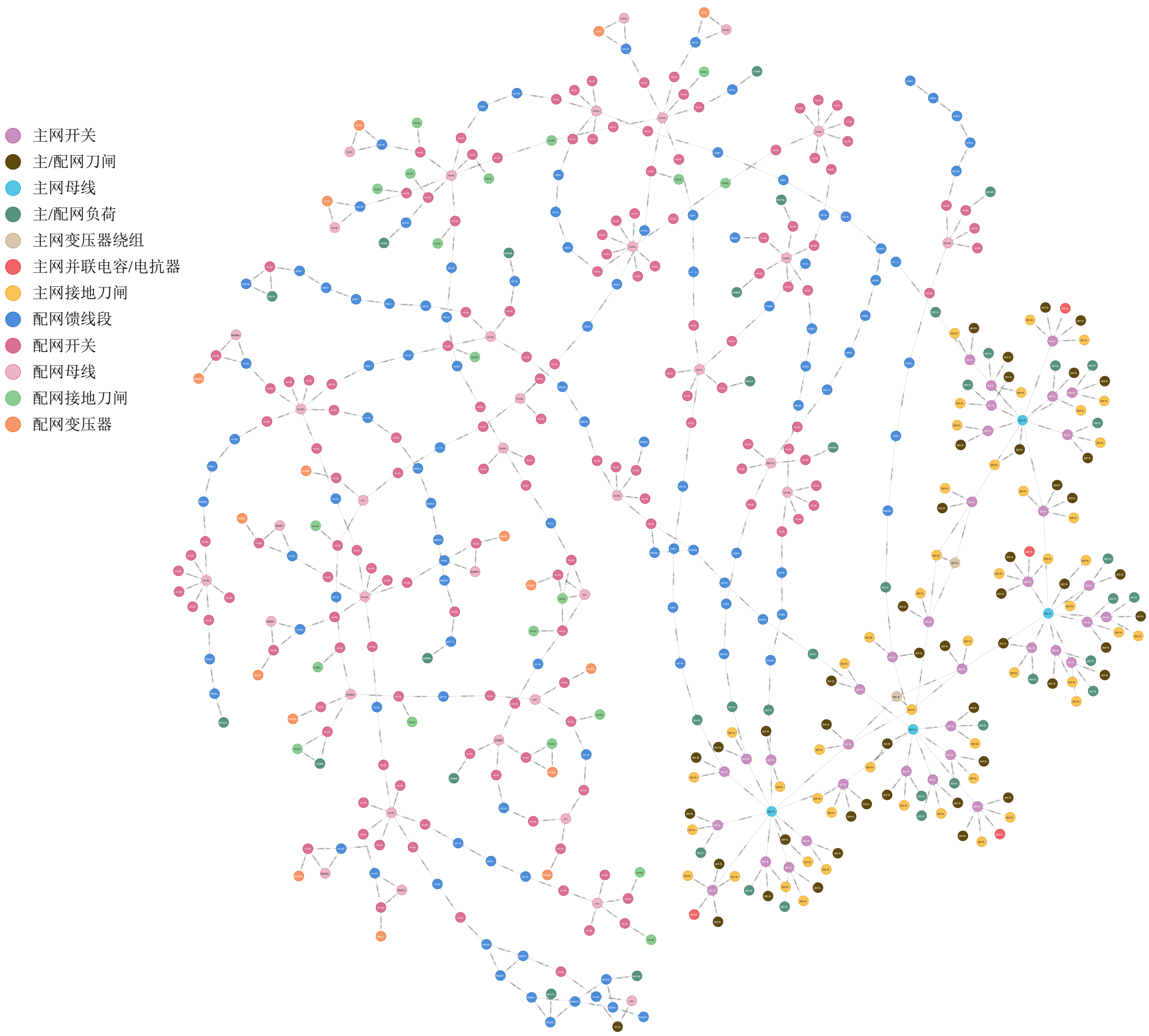


图 A2　某地 xx 变/10kV #2 线 226 的图数据建模结果

Fig. A2　Graph data modeling results for line #2, 226 at xx substation/10kV in a certain location

```
T:\ENV\jdk\amazonCorretto11\bin\java.exe ...
========= 故障区段定位结果 =========
定位完成，耗时: 19 ms

=== 故障区段边界信息 ===
起始开关:
设备名称: 10kV长建#2线#1环网柜-103
设备类型: 配网开关(DMS_CB_DEVICE)
设备ID: DMS_CB_DEVICE113
运行状态: 分闸
所属馈线: 10000100_610353
终止开关:
设备名称: 10kV长建#2线#2环网柜-210_1
设备类型: 配网开关(DMS_CB_DEVICE)
设备ID: DMS_CB_DEVICE235
运行状态: 分闸
所属馈线: 10000100_610353

=== 故障区段特征 ===
设备数量: 12台
影响用户: 25户

=== 拓扑信息 ===
起始开关拓扑点: IND=-8872691, JND=-8872692
终止开关拓扑点: IND=-8872698, JND=-8872697
搜索算法: Yen K-最短路径

Process finished with exit code 0
```

图 A3　故障溯源算例结果

Fig. A3　Fault point search results