

基于图论的电网拓扑搜索性能提升方法 研究与应用

梁添增

(厦门亿力吉奥信息科技有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 随着电力能源需求日益增长, 电网规模不断扩大, 供电可靠性要求不断提高, 电网数据量也随之快速增长, 传统的电网地理信息系统拓扑搜索分析性能低, 已不能满足实时性的应用要求。提出一种基于图论的高性能电网拓扑搜索方法, 应用图论原理将电网网架模型抽象为无向拓扑图, 以电网拓扑搜索需求为导向, 分析了传统基于关系型数据库的拓扑搜索原理及不足, 设计适应于电网网架无向拓扑图的图数据存储模型, 搭建了 PostgreSQL 关系型数据库与 Neo4j 图数据库验证测试环境。测试结果表明, 在相同的实验条件下, 所提方法随数据量不断增加保持性能稳定, 能较好地满足大数据量拓扑搜索分析的使用需求。

关键词: 电网拓扑; 无向拓扑图; 图数据库; Neo4j

Research and application of performance improvement method for power network topology search based on graph theory

LIANG Tianzeng

(Xiamen GEO Information Technology Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: With the increasing demand for power energy, the scale of the power grid is expanding, the reliability of power supply is improving, and the data volume of the power grid is growing rapidly. The traditional power grid GIS topological search has low performance and can no longer meet the real-time application requirements. This paper proposes a high-performance power grid topological search method based on graph theory. The method abstracts the power grid network model into a directed graph according to the principles of graph theory, analyzes the traditional topological search principle and shortcomings based on relational database, designs a graph data storage model suitable for the directed graph of the power grid network, and builds a PostgreSQL relational database and Neo4j graph database verification and test environment. The test results show that under the same experimental conditions, the proposed method performs stable with the increase of data volume, and can meet the needs of large data volume topological search analysis.

Keywords: power network topology; undirected graph; graph database; Neo4j

0 引言

电网拓扑分析是电力管理与维护系统中的关键组成部分，对其进行深入研究具有重要意义^[1-2]。随着社会的发展和科技的进步，电力能源的需求日益增长，电网规模不断扩大。同时，供电可靠性要求的提高及新型电力系统的建设使得电网结构日益复杂。随着可再生能源发电比重的增加，现代电网呈现出电网结构不断扩大、运行控制日趋复杂的显著特性^[3]。现有的电网网架信息化管理依赖地理信息系统（GIS系统）进行图形资源管理，并由地理信息系统提供电网网架拓扑连通性搜索、分析与应用，而传统的地理信息系统采用关系型数据库存储与管理数据，应用层通过SQL语言与数据库不断迭代查询实现电网网架链接关系搜索。在构建对外提供电网网架的拓扑搜索分析服务的高性能的应用服务，进行大范围搜索分析时，出现了迭代搜索量大幅增加、计算效率偏低、数据库访问吞吐量增加等问题。因此，亟需建立新的拓扑搜索方法，以解决日益凸显的电网规模不断增大与拓扑搜索性能降低的矛盾。

针对上述问题，本文以图论原理为基础，分析大范围电网拓扑搜索需求，提出一种基于图论的高性能电网拓扑搜索方法，其基本思想是：回归到电网物理网架形态，基于图论原理分析，将庞大的电网结构中的各类设备（如变压器、开关、电杆和配电房等）视为一系列节点，基于节点间的供电关系构建出一张电网拓扑图，并建立适应图数据存储模型的电网结构模型。以图为单元，发挥图数据的特性，实现电网拓扑图中各节点间的快速搜索。

1 图论原理与拓扑模型

1.1 图论原理

本文使用图论方式表达电力设备之间的逻辑关系，在此之前需对图进行定义。

图可作为电力设备之间关系的数学呈现形式^[4]，令 P 、 E 分别表示节点集和边集，由节点

集、边集组成一个图，节点集和边集表达式为

$$P=\{p_1, p_2, \cdots, p_n\} \quad (1)$$

$$E=\{e_1, e_2, \cdots, e_m\} \quad (2)$$

式中， n 和 m 分别为节点数量和边数量。

式（1）的二元素子集均由有限边构成，由 $\{p_i, p_j\}$ 表示，通过非空节点集内的节点之间关联构成具有互相连接关系的边集合，由此形成图^[5]。

按照具有关联关系边的属性，图又分为有向图和无向图。若节点 p_j 的前驱为 p_i ，且符合该边二元素子集按某种顺序排列，则两个节点之间的边是有向的。若图内所有节点均符合上述关系，则该图称为有向图^[6]。

若有向图内存在4个节点，则边表达式为

$$\begin{cases} e_1=(p_2, p_1) \\ e_2=(p_3, p_2) \\ e_3=(p_4, p_3) \\ e_4=(p_1, p_4) \end{cases} \quad (3)$$

若所有边的二元素子集混乱排列，则该图为无向图，在无向图内，边的表达式为

$$\begin{cases} e_1=(p_2, p_1)=(p_1, p_2) \\ e_2=(p_3, p_2)=(p_2, p_3) \\ e_3=(p_4, p_3)=(p_3, p_4) \\ e_4=(p_1, p_4)=(p_4, p_1) \end{cases} \quad (4)$$

以上研究了图的定义、有向图、无向图和边的表达形式，为下文的电网网架拓扑图等效模型提供理论基础。

1.2 拓扑模型

完整的电网网架包含发电、输电、变电、配电和用户等电力传输全环节链路，能直观呈现电力设备在电网网架中的具体位置、方向及电气接线关系等信息。考虑单条配电网网架，以变电站为电源点，以变电站母线下的站内断路器（出线开关）为线路起点，以低压用户计量箱为线路末端，按线路的形式进行网架的细化管理。电网网架示意结构如图1所示。

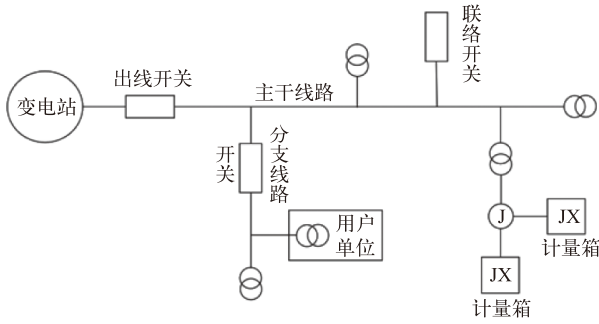


图1 电网网架结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power grid structure

令 $G(P, E)$ 表示电网网架无向拓扑图, 该图内具有 n 个节点; P 、 E 分别为该无向拓扑图内顶点集合与边集合; P'_a 、 P'_b 分别为电网设备节点集合与连接节点集合; 因此无向拓扑图内顶点集合为 $U=\{P'_a, P'_b\}$; 全部电网设备节点集合与连接节点集合为

$$P'_a = \{p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{an}\} \quad (5)$$

$$P'_b = \{p_{b1}, p_{b2}, \dots, p_{bn}\} \quad (6)$$

令 E'_a 、 E'_b 分别为无向拓扑图内电网设备边集合与连接边集合, 则无向拓扑图内边集合为 $E=\{E'_a, E'_b\}$, 全部电网设备边集合与连接边集合为

$$E'_a = \{e_{a1}, e_{a2}, \dots, e_{an}\} \quad (7)$$

$$E'_b = \{e_{b1}, e_{b2}, \dots, e_{bn}\} \quad (8)$$

依据图论定义获取电网网架无向拓扑图。将电网设备和设备连接关系的交叉点作为节点, 以连接关系的边为无向拓扑图的边, 参考图1将电网网架以图元形式呈现, 后转换为节点形式, 电网网架无向拓扑图如图2所示。



图2 电网网架无向拓扑图

Fig. 2 Undirected topology diagram of power grid structure

依据上述获取到的电气设备无向拓扑图, 计算各个设备之间的逻辑关系。由于电网网架设备作用不同且构成复杂, 本文仅针对设备的性质与功能之间的逻辑关系进行提取, 以电网网架无向拓扑图内的核心设备 (如出线开关) 作为提取的第一元素。

参考T/CSEE 0050.3—2017《电网地理信息服务平台(GIS)第3部分: 图元规范》定义, 电网网架图元由11个大类、52个中类和89个小类构成。其中, 开关、变压器等核心电力设备可视为连接点; 导线、电缆和连接线在电网结构中作为连接两端设备的线性设备, 起到传输和导电的作用, 可以视为连接关系的边; 而变电站、配电站、开关站等厂站类在电网结构中起汇聚和分配的作用, 可以视为具有多条连接边的交叉点。

依据上述数据, 可完整地表达电网网架各设备的连接关系, 获取设备逻辑关系具体流程如下。

- 1) 提取电网网架中所有设备信息, 获取设备类型。
- 2) 遍历无向拓扑图内所有边, 包括导线、电缆及连接线, 获取两端设备信息。
- 3) 判断两端设备是否存在线设备, 若存在, 则标记为连接点, 并增加一个连接点设备, 与边形成连接关系。
- 4) 将导线、电缆和连接线类电网设备均视为一条连接边, 形成边集合 $E(G)$ 。
- 5) 将开关、变压器和厂站类电网设备均视为一个节点, 并加上连接点集合, 形成节点集合 $P(G)$ 。
- 6) 依据节点集合与边集合关系, 输出设备逻辑关系数据并保存。

2 电网拓扑搜索分析

2.1 电网拓扑搜索需求分析

对电网进行拓扑搜索分析的主要目的在于结合开关状态、故障信息及时间戳等信息, 为

电力生产管理业务提供电网链路连通、供电拓扑等拓扑分析能力，提供包括停电范围、连通性分析、电源点追溯、拓扑检测和供电半径等拓扑相关服务接口，并实现基于开关历史状态的时态拓扑分析能力^[7-9]。其本质是将电网网架中的设备模型描述为一张拓扑图，并对其进行广度搜索。

电网的拓扑搜索分析主要分为电网链路连通性分析与供电拓扑分析。电网链路连通性分析与开关状态无关，主要应用在网架设备搜索遍历场景中；供电拓扑分析与开关状态相关，开关状态可以定义为节点的属性，开关断开视为节点不连通，开关闭合视为节点连通。其本质可以理解作为一种动态电网链路连通性分析。

供电拓扑分析主要包含母线分析与电气岛分析^[10]，共分为两个步骤。

1) 母线分析是指利用闭合开关将相连的节点转换为母线，并对其进行编号，进而形成唯一的母线号，循环上述过程直至所有节点均与母线相关联为止。

2) 电气岛分析是建立在母线分析的基础上，将支路相互连通的母线整合为一个电气岛。电气岛通常分为活岛和死岛两种类型，区别在于是否包含电源与负荷，两者都包含的电气岛称为活岛，反之则称为死岛。

2.2 传统拓扑搜索分析

传统电网拓扑搜索时，需要将电网理解为一个由开关和节点描述的物理模型，而拓扑分析需要将电网抽象为数学模型，最常见的是母线、线路描述的数学模型。将电网网架以电力设备为单元进行建模，根据不同的设备类型记录设备属性，为了表达电力设备之间的电气关系，在设备属性中会定义端点和连接点，电力设备通常含有一个或多个端点，而连接节点由两个及以上设备的端点连接在一起。这种模型描述了电网物理连接信息，也称为开关/节点模型^[11]，该模型样例如图3所示。

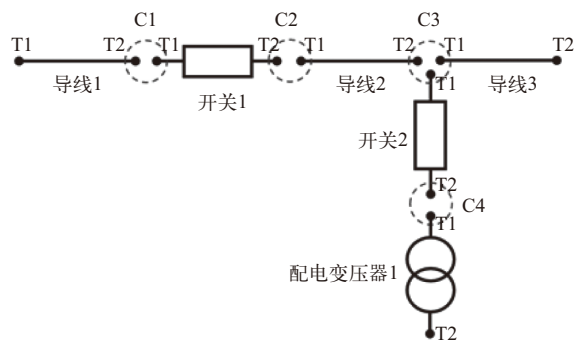


图3 开关/节点模型样例

Fig. 3 Switch/Node model example

基于开关/节点模型设计，电网网架以设备为单元存储在关系型数据库中。图3样例在数据库中的逻辑模型见表1。

表1 开关/节点模型逻辑模型

Tab. 1 Switch/Node model logic model

设备	属性 1	...	T1	T2
导线 1				C1
导线 2			C2	C3
导线 3			C3	
开关 1			C1	C2
开关 2			C3	C4
配电变压器 1			C4	

基于上述模型描述，结合关系型数据SQL语言，应用广度搜索算法，由单设备属性关系查询结果不断迭代遍历查询整个电气岛拓扑。广度优先搜索法采用广度优先搜索的原理“先进先出”，如图3样例所示，假设以导线1为搜索起点，其拓扑搜索步骤为：

1) SQL查询导线1的关系属性，T1端点为空，T2端点连接在C1连接点处。

2) SQL查询C1连接点，其连接设备包含导线1、开关1，过滤已搜索过的导线1，获取开关1另一端点T2端点连接在C2连接点处。

3) SQL查询C2连接点，其连接设备包含开关1、导线2，过滤已搜索过的开关1，获取导线2另一端点T2端点连接在C3连接点处。

4) SQL查询C3连接点，其连接设备包含导线2、导线3和开关2，过滤已搜索过的导线2，获取导线3另一端点T2端点连接关系为空，获取开关2另一端点T2端点连接在C4连接点处。

5) SQL查询C4连接点，其连接设备包含开关2、配电变压器1，过滤已搜索过的开关2，获取配电变压器1另一端点T2端点连接关系为空。

6) 所有待查询的连接点已完成，搜索结束。

广度搜索算法规避了对一个节点多次访问的情况，在图3样例所示搜索顺序为：导线1、开关1、导线2、导线3、开关2和配电变压器1。相对于深度搜索法和邻接矩阵法，广度搜索算法规避了回溯的问题，是拓扑搜索的一种较优算法。

2.3 基于图数据库拓扑搜索分析

采用传统广度搜索算法实现电网拓扑分析时，若电网规模较小，则拓扑分析可以取得良好的效果。但随着电网规模的扩大，庞大的开关/节点模型数据表及频繁的数据库SQL查询访问限制了拓扑分析的性能，难以满足大规模、高性能配电网拓扑分析应用需求。为此，提出了一种基于图数据库特性进行拓扑搜索分析的方法，对传统拓扑分析方法存在的问题进行优化。

图数据库将结构化数据存储在网络上，而非数据表中，使用节点存储数据和关系存储数据构建出复杂的嵌套关联的非结构化数据结构。节点存储

文件用来存储节点记录，用户在图中创建的每个节点最终都记录于节点存储文件中。在图数据库中，节点存储一般都是固定大小的记录存储，固定大小的记录可对存储文件中的节点进行快速查找。关系存储一般由固定大小的记录组成，每条关系记录都包含关系开始节点和结束节点、指向关系类型的指针、指向每个开始和结束节点的前后关系记录的指针节点和一个标志，指示当前记录是否是关系链的第一条记录^[12]。存储结构示意图如图4所示。

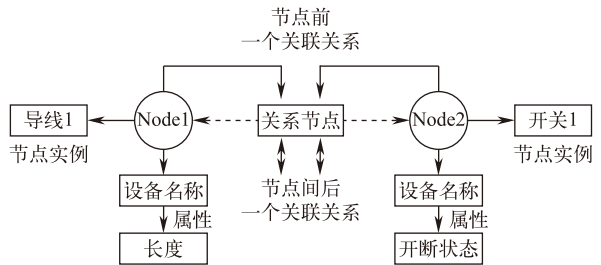


图 4 图数据存储结构示意图

Fig. 4 Diagram of data storage structure

根据所述建模方法，获取电网网架无向拓朴图，将电网设备和设备连接关系的交叉点实例化为节点存储数据，将设备连接关系实例化为关系存储数据。建模、实例化存储过程示意图如图5所示。

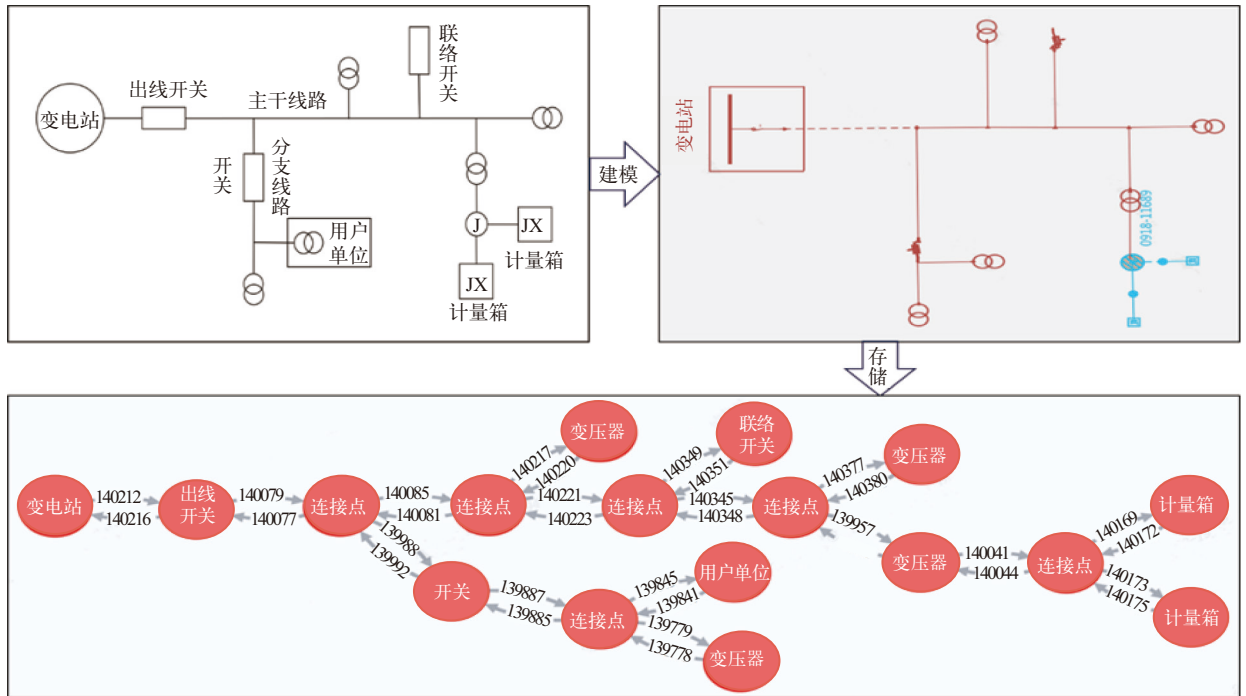


图 5 建模及实例化存储示意图

Fig. 5 Modeling and instantiation storage schematic diagram

实例化存储完成后,应用图数据库存储结构查询语言(如Neo4j图数据库的Cypher语言)实现高频查询。相比SQL的严谨、规范,图数据库查询语言更容易理解和编程,它允许开发者以一种自然的方式表达查询需求,如查找节点、关系和路径,使开发者能够快速构建并执行复杂的查询。

图数据库的图形结构与属性数据的分离存储,使得每个存储文件都包含图数据库的节点、关系和标签等特定部分的数据。图数据库的存储职责划分等存储结构特性决定着其具有支持高效插入、快速图形遍历等特点。与关系型数据库相比,在性能上具有绝对的优势。

随着数据库中数据的不断增加,关系型数据库在处理这种较大量的数据查询时,性能会显著降低;而图数据库在数据量不断增加时,性能不会降低,而是保持稳定^[13]。原因是在发生查询事件时,真正需要检索的内容只与数据的一部分有关,邻近查询始终查找的是有限的局部数据,不会对整个数据库进行搜索,查询任务执行时所需时间只和该部分遍历的图大小成正比。相比于关系型数据库,可以提高数倍乃至数十倍的查询速度。

3 实验与分析

为了验证所提基于图数据库特性进行拓扑搜索分析的可行性与性能提升指标,与某电力公司合作进行了验证实验。

3.1 实验环境

利用VC++搭建了一套实验环境,如图6所示。该环境包含拓扑搜索分析、数据解析建模、SQL读写服务、图数据库服务、人机交互模块和数据库等。采用开源PostgreSQL关系型数据库存储电网网架的开关/节点模型数据,采用开源Neo4j图数据库存储电网网架节点存储数据及关系存储数据。人机交互模块为操作人员提供可视化界面,操作人员通过该界面进行拓扑搜索分析、分析结果对比及数据录入建模等操作。

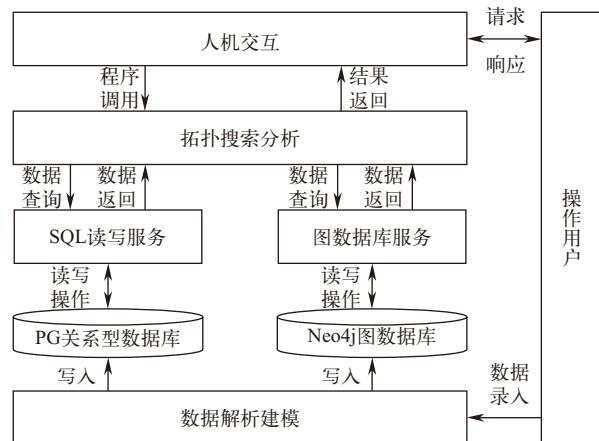


图6 实验环境

Fig. 6 Experimental environment

需要说明的是,操作用户通过该装置提供的人机交互模块请求执行拓扑搜索分析操作时,拓扑搜索分析模块会根据请求参数要求,并行请求SQL读写服务获取数据开展传统拓扑搜索分析计算,与图数据库服务获取数据开展基于Neo4j图数据库的拓扑分析计算,并分别返回拓扑搜索分析结果。

3.2 实验分析

为了体现传统拓扑搜索分析与基于图数据库的拓扑搜索分析方法性能差异,此次实验设置同等服务器配置、本地服务交互、录入同等数据量进行拓扑搜索分析耗时对比,以减少因配置差异、网络环境和数据量差异等环境造成的干扰。实验环境配置信息见表2。

表2 实验环境配置信息

Tab. 2 Experimental environment configuration information

服务器	性能测试环境	
	硬件配置	操作系统及 IP
应用服务器	CPU 配置: Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1.80 GHz 2.30 GHz 内存配置: 8 GB	操作系统: Windows10 IP: localhost
Neo4j 图数据库服务器	CPU 配置: Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1.80 GHz 2.30 GHz 内存配置: 8 GB	操作系统: Windows10 IP: localhost
PostgreSQL 数据库服务器	CPU 配置: Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1.80 GHz 2.30 GHz 内存配置: 8 GB	操作系统: Windows10 IP: localhost

实验首先在列表或图中选择一条线路，经过拓扑搜索分析可知，线路起点开关设备存在拓扑连接关系的所有设备，根据返回结果在图中高亮显示。

实验分别选择搜索1层、5层、10层、20层、30层和50层等，逐步增加递归搜索层级，记录搜索分析耗时并进行对比，实验结果见表3。

表3 拓扑搜索分析耗时实验结果
Tab. 3 Topology search analysis time-consuming experimental results

拓扑层级	拓扑搜索分析耗时 /ms		
	设备数量 / 个	PG 数据库 拓扑搜索分析	Neo4j 数据库 拓扑搜索分析
1	3	19	228
5	54	103	216
10	187	479	215
20	396	1 414	211
30	701	3 051	227
40	900	4 483	228
50	974	4 973	243
60	1 046	5 326	226
70	1 159	6 083	242
80	1 243	6 562	238
90	1 312	6 867	242
100	1 340	7 031	229
120	1 353	7 166	229

通过实验记录基于PG数据库的拓扑搜索分析与基于Neo4j数据库的拓扑搜索分析耗时数据。由表3可以看出，数据量较小的情况下，基于PG数据库的拓扑搜索分析方法性能较优，但随着搜索分析层次增加，数据查询频率增大，该方法耗时增加，性能急剧下降。而基于Neo4j数据库的拓扑搜索分析方法随着搜索分析层次增加，耗时比较稳定。两种方法的拓扑搜索分析耗时对比如图7所示。

由该项实验结果可以看出，传统拓扑搜索方法应用关系型数据库存储开关/节点模型，并通过迭代查询数据方法实现拓扑搜索分析，其性能随着数据量增大，存在很大的瓶颈。而图数据库

节点存储与关系存储模式的特性使得图数据库在数据量不断增加时，其性能保持稳定。因此在大数据量拓扑搜索分析使用需求中，应当使用基于图数据库构建的拓扑搜索分析服务。

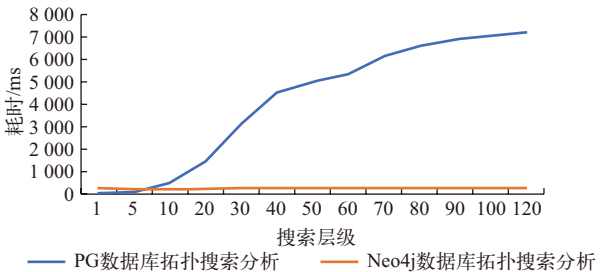


图7 两种方法搜索分析耗时对比
Fig. 7 Comparison of search and analysis time between two methods

4 结束语

为了提升大数据量、大范围分析应用需求下的拓扑搜索分析性能，文中在分析了传统拓扑搜索分析原理的基础上，提出了一种基于图论原理的高性能电网拓扑搜索分析技术。该技术结合电网网架物理特性，基于图论原理设计了一套契合图数据库存储结构的电网网架存储模型，搭建基于PostgreSQL关系型数据库与Neo4j图数据库的拓扑搜索分析环境，实验结果验证了基于图数据库的拓扑搜索分析方法的有效性，并体现了其性能优势。

参考文献

[1] 万中奇, 祁宏, 李清涛, 等. 基于多变量维纳滤波的中低压电网拓扑学习方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(6): 624-628.

[2] 沈政委, 汤涌, 易俊, 等. 用于电网拓扑优化的输电线开断控制研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 475-483.

[3] 谢芮芮, 徐铭铭, 等. 配电网新能源承载力多目标决策评估方法[J], 供用电, 2024, 41(7): 99-107.

[4] 梁礼明, 陈明理, 刘博文, 等. 基于图论的支持向量机核函数选择[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(5): 1316-1321.

- [5] 王旭东, 林济铿, 等. 电力孤岛划分研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 125-135.
- [6] 戈志华, 梁洪波, 何洁, 等. 基于图论的复杂供热管网设计[J]. 热能动力工程, 2018, 33(6): 94-98.
- [7] 林志超. 自适应配电网拓扑与开关配置的智能分布式保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 149-156.
- [8] 肖飞, 杨国健, 邓祥力, 等. 基于电网故障拓扑分析及多数据综合的复杂故障诊断方法[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 189-192.
- [9] 郭飞, 王波, 王亮, 等. 基于海量运行数据挖掘的电网拓扑关系分析及应用[J]. 电力大数据, 2021, 24(2): 85-92.
- [10] 赵光, 臧志斌, 等. 基于融合邻接矩阵的多时态局域电网拓扑分析技术[J]. 电子设计工程, 2024, 32(5): 160-164.
- [11] 王修岩. 基于Storm的电压暂降影响域快速分析研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [12] 卜令彬. 基于Neo4j图数据库的地理场景数据组织方法[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [13] 魏富静, 叶于林, 等. 关系型数据库转图数据库的数据集成方法研究[J]. 网络安全技术与应用, 2023(12): 59-61.

作者简介

梁添增(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化、电力信息化。

(收稿日期: 2024-11-19)