

基于图模型的电力系统 碳流计算优化研究

朱广新, 周春雷, 李俊妮, 宋继勳, 史昕, 沈子奇
国家电网有限公司大数据中心, 北京 100053

摘要

首先介绍了图数据模型、图数据库和图计算的基本原理, 包括图数据库的数据模型、查询语言以及常见图计算方法等。然后详细阐述了电力系统的图数据模型构建方法, 将系统组件表示为节点, 组件间关系表示为边。最后设计了碳流计算的图算法流程, 利用AtlasGraph图数据库及图计算组件进行碳流传递迭代计算。该方法充分利用图数据库和图算法的优势, 实现了对电力系统碳流的精确高效计算。该研究为电力系统碳排放的监测、分析和优化提供了有力支持, 对于推动电力系统绿色低碳发展具有重要意义。

关键词

图数据库; 图计算引擎; 电力系统; 碳流计算; 绿色低碳发展

中图分类号: TM71

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-0271.2024027

Research on power system carbon flow calculation based on graph database and graph computing engine

ZHU Guangxin, ZHOU Chunlei, LI Junni, SONG Jimeng, SHI Xin, SHEN Ziqi
Big Data Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China

Abstract

Firstly, the basic principles of graph database and graph algorithms are introduced, including the data model of graph database, query language, and common graph algorithms. Then, the method of constructing the graph model of the power system is elaborated, where system components are represented as nodes and component relationships are represented as edges. Finally, the graph algorithm process of carbon flow calculation is designed, using the AtlasGraph graph database and graph computing components to perform carbon flow iterative calculation. This method makes full use of the advantages of graph database and graph algorithms, achieving accurate and efficient calculation of power system carbon flow. This research provides strong support for monitoring, analyzing, and optimizing carbon emissions in power systems, and is of great significance for promoting the green and low-carbon development of power systems.

Key words

graph database, graph computing engine, power system, carbon flow calculation, green and low-carbon development

0 引言

图数据库和图算法在各个领域的应用使复杂关系数据的建模、存储和分析变得更加高效和便捷。图数据库提供了一种灵活的数据模型,能够很好地表示现实世界中的复杂关系,而图算法则提供了强大的查询和分析能力,可以帮助人们从图中挖掘出有价值的信息和模式。随着大数据和实时计算的需求不断增加,图数据库和图算法在工业界的应用将越来越广泛,成为解决复杂关系数据问题的关键技术。传统的电力系统仿真计算主要采用矩阵迭代计算等方法解决电网状态估计、潮流计算等问题,近年来随着分布式新能源、充电桩的兴起以及对配电网高质量发展的要求,需要管理的电网设备从千万级跃升至亿级、十亿级,同时大量的数据计算要求大规模、准实时,传统的矩阵计算方法难以满足这些计算需求。电网是一个天然的图数据模型,母线、变压器、开关等可以作为节点,线路、连接关系可以当作边。图数据模型和电力系统物理结构高度匹配,可以自然高效地对电力系统进行图建模,大幅度提升了电力数据管理规模、管理效率和查询速度。本文以电力系统碳流为典型的研究范例,深入探讨基于图计算的电力系统建模及碳流仿真计算方法,并分析该方法的优点及将为电网带来的效益。

1 研究背景

1.1 电力系统碳排放流分析的研究价值

2013年以来,我国参考《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》,编制了一系列区

域、行业碳排放核算方法,初步构成以物料平衡法为基础,排放因子法为主要方法的碳核算体系。排放因子法的基本思路是依照碳排放清单列表,针对每一种排放源构造其活动数据与排放因子,以活动数据和排放因子的乘积为该排放项目的碳排放量估算值,即:

$$E = A \times EF \times (1 - ER/100) \quad (1)$$

其中, E 为温室气体排放量; A 为活动水平(单个排放源与碳排放直接相关的具体使用和投入数量); EF 为排放因子(单位某排放源使用量所释放的温室气体数量); ER 为消减率,指的是通过采取减排措施后,相对于基准情景(指没有采取任何减排措施时的情况)温室气体排放量减少的百分比。其中,各种活动水平数据大多由国家相关标准严格监测,而排放因子来自相关部门出具的缺省值。因此,准确测算排放因子是保障我国碳数据核算准确性、健全我国碳核算体系的重要抓手。

目前电力碳排放因子主要有国家气候战略中心发布的《2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》、生态环境部环境规划院发布《中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023)》,生态环境部《关于做好2023—2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》中提出的2022年度全国电网平均排放因子。总体来看,目前为止全国性的电力碳排放核算均采用以上几类全国或者区域碳排放因子进行核算,存在更新频度低、分辨率低等问题,难以影响企业的用电行为及其在电力市场、碳市场的交易行为,也难以促进碳交易市场与电力交易市场(包括绿电交易市场)的有机结合与协调发展。因此,急需一种高频次、高分辨率的电网碳排放因子,而电力系统碳流计算则是核算高分辨率碳排放因子的重要

手段。

电力系统碳流计算是一种用于评估电力系统碳排放的方法，其基本原理是将电力系统的碳排放流定义为依附于电力潮流存在且用于表征电力系统中维持任一支路潮流的碳排放所形成的虚拟网络流。通过电力系统碳流计算，能够得到电网中每一条支路和节点的碳排放强度，即该支路或者节点单位电度包含的碳排放。基于支路和节点的碳排放强度，可以核算任意网格下的碳排放因子。相比传统碳排放因子核算手段，该方法可以实时监测并量化电力系统各环节的碳排放，从而揭示碳排放与电力生产、传输、分配及消费之间的内在联系。该方法在优化电力系统的调度和运行方式、减少能源浪费、降低碳排放方面起到重要的支撑作用，对推动电力行业绿色低碳发展具有重要意义。电力系统碳流计算也将成为电力系统运行和规划的重要工具，促进能源与环境的可持续发展。

1.2 图模型在电力系统碳流计算中的应用前景

传统的电力系统仿真（如状态估计、潮流计算）主要采用矩阵运算。然而，这种基于矩阵的方法在处理复杂电力系统时存在一定的局限性，例如，对于稀疏矩阵的数据冗余、稀疏性处理困难，需要对整个矩阵进行操作导致的并行化困难，当采用超大规模矩阵运算出现问题时需要对整个矩阵进行更新导致故障处理复杂，以及对于包含非线性元件（如风力涡轮机或太阳能电池板）的电力系统矩阵方法可能难以准确建模。这些局限性阻碍了矩阵方法在处理大规模、动态和非线性的现代电力系统方面的有效性。

图计算是一种新的计算范式，可以利

用图这种数据结构来有效地表示和处理电力系统网络。同时，图算法可以实现对电力系统中各个节点的并行计算，每一步计算不受上一步的影响，从而提高了计算效率和可扩展性。此外，图计算可以轻松地处理非线性模型，使其非常适合模拟现代电力系统中的可再生能源和配电网优化等复杂问题。碳流计算是电力系统仿真中的一个重要问题，它涉及跟踪电力系统中碳排放的流动。图计算可以利用其并行计算和非线性建模能力来有效地解决碳流计算问题。通过将碳排放源和碳排放流建模为图中的顶点和边，图计算能够准确计算电力系统中各个组件的碳足迹。利用图算法优化电力系统调度和运行，可以在满足需求的同时，最小化碳排放，找到最佳解决方案。此外，图计算还能模拟可再生能源的非线性行为，评估其对碳排放的影响，并优化可再生能源的集成，有助于电力系统规划者实现低碳运行和可持续发展。

2 研究进展

2.1 图数据库与图算法在矩阵运算中的应用研究

许多介绍稀疏矩阵算法的论文采用了图的概念。重要的贡献包括文献[1-4]。重要的思想最早出现在一些早期专注于稀疏矩阵计算的会议的出版记录中，包括文献[5-8]。20世纪60年代和70年代的基础工作大部分在Tewarson^[9]的书中给出了，后来Pissanetzky^[10]进行了总结。文献[11-14]关于稀疏因子分解的通用文本提供了更多的参考和示例。关于数据结构和图搜索的讨论可以参见文献[15-16]。深度优先搜索算法的系统分析在文献[17]中

给出,但这种搜索基于的回溯技术在人工智能和组合优化中更早地被使用。近年来,图数据库和图算法在矩阵运算中的应用研究取得了显著进展。这些进展体现在矩阵分解与近似、矩阵乘法与线性求解、推荐系统与机器学习以及网络分析等领域。通过优化数据结构和计算流程,图算法能够显著提高稀疏矩阵的操作效率,为推荐系统提供更准确的预测结果,并高效提取网络中的关键信息。随着技术的不断发展,图数据库和图算法将在更多领域发挥重要作用,为解决复杂关系数据问题提供关键技术支持。

2.2 电力系统碳流计算的研究现状

在电力系统碳流计算的研究领域,周天睿等^[18-20]奠定了碳排放流计算方法的基础,并揭示了碳排在电力网络中的分布规律和作用机制,为碳排放流理论体系的构建贡献了重要理论基础。袁书林等^[21]进一步发展了碳排放流理论,提出了一种新的电力碳排放分摊机制。汪锋等^[22]从二次能源的终端消费视角出发,基于碳排放流理论,提出了一种计算中国各省化石能源消费碳排放量的方法。马瑞等^[23]则专注于风电的随机性和不确定性对碳排放流的影响,他们开发了一种分析方法,计算了风电功率注入对碳排放流的具体影响程度。龚昱等^[24]在考虑电网损耗的情况下,建立了一个碳排放流追踪模型,该模型能够揭示无功功率对碳排放流的影响。张孝顺等^[25]提出了一种计算最优碳排放流的方法。康重庆等^[26]进一步提出了电力系统碳排放流的递推算法,将碳流计算简化为节点之间的递推,为利用图算法解决碳流计算问题奠定了理论基础。范宏等^[27]提出了一种利用图计算解决碳强度优化仿真的新方法,实现了碳强度的节点并行计算,从而提升了

计算的效率。

本文在前人研究的基础上,进一步探讨利用图数据库作为持久化存储,以及图数据库的图计算引擎作为碳流计算引擎进行碳流计算的方法。这种方法将存储和计算结合在一起,形成了一种一体化的模式。本文将探讨这种模式与传统工业矩阵仿真计算相比的优势。

3 研究内容

3.1 图数据库与图算法的基本原理

图数据库是一种非关系型数据库,其主要以图结构来存储和查询数据。图数据模型通常被称为属性图模型(property graph model),在这种模型下,数据被组织成一个由节点和边构成的网络结构,允许任意复杂的关联和嵌套关系。这种模式特别适合表达多对多、动态变化和高度关联的数据场景。

在图数据库中,数据被表示为节点(node)、边(edge)以及属性(property)的集合。节点代表实体或对象,每个节点都有一个唯一的标识符,并且可以携带一组键值对形式的属性,用于描述节点的特征或状态信息。边用来连接两个节点,表示它们之间的关系。每条边也可以拥有自己的属性,用于记录关系的具体性质、时间戳或其他相关信息。边既可以是有序的(从一个节点指向另一个节点),也可以是无序的。属性是附加在节点或边上的键值对数据,提供了额外的信息描述。例如,在社交网络中,用户节点可能有“姓名”“年龄”等属性,好友关系边则可能有“建立日期”等属性。

图查询语言是一种专门设计用于查询和操作图数据库中节点、边以及它们

之间关系的编程接口。如Cypher (Neo4j所采用的语言)、Gremlin (TinkerPop项目支持的语言)、GraphQL (主要用于API设计)等图查询语言,通常具有声明式的语法,允许用户以直观的方式表达复杂的图模式匹配和遍历操作。图查询语言为图数据库提供了访问和操作数据的强大工具,它们使开发者可以高效地发掘隐藏在复杂网络中的深层次关系和模式。

图算法是专门针对图结构数据进行处理和分析的方法。在图数据库应用中,常见的图算法包括最短路径算法(如Dijkstra、A*算法)、社区检测算法(如Louvain方法、Label Propagation)、PageRank算法(用于计算节点重要性)等。这些算法可以在图数据库内部直接执行,以便快速获取复杂关系网络中的关键信息,如发现潜在联系、优化流程或识别模式。通过结合图数据库的索引机制和原生支持的并行运算能力,图算法能够在大规模数据集上高效运行。图算法在处理稀疏矩阵计算时发挥着重要作用,包括邻接矩阵遍历、最短路径算法、最小生成树算法、PageRank算法、稀疏矩阵乘法、稀疏矩阵分解和社区检测算法等。这些算法在处理稀疏矩阵时充分利用了矩阵的稀疏特性,从而降低了计算复杂性和内存消耗,提高了问题解决的效率和可行性。这些算法在电力网络潮流计算、网络流优化、通信网络设计等场景中具有广泛应用。

3.2 电力系统碳流计算的图模型构建

在图数据库中,电力系统的模型表示通常涉及将系统的组件表示为节点,而组件之间的相互关系或交互表示为边。

电力系统的节点表示主要包括以下7种。

- 发电机:表示发电厂中的发电机单元。属性包括发电机的名称、类型、额定功率、燃料类型、运行状态等。

- 变压器:表示用于电压转换的设备。属性包括变压器的名称、额定功率、变比、连接类型、运行状态等。

- 母线:表示电力系统中电能汇集和分配的点。属性包括母线的名称、电压等级、类型(如发电机母线、负载母线等)、运行状态等。

- 负载:表示电力系统的消费者,如工业、商业或居民用户。属性包括负载的名称、类型、额定功率、需求响应能力等。

- 断路器:表示用于控制电路通断的开关设备。属性包括断路器的名称、类型、额定电流、开关状态等。

- 保护装置:表示用于检测故障并隔离故障区域的设备。属性包括保护装置的名称、类型、保护范围、动作时间等。

- 补偿设备:表示用于改善电力系统功率因数的设备,如电容器或电感器。属性包括设备的名称、类型、额定容量、运行状态等。

电力系统的边表示主要包括以下两种。

- 电源连接:表示电力从发电机流向母线、变压器或其他负载的路径。属性包括线路的名称、类型、额定容量、当前负载、损耗等。

- 物理连接:表示设备之间的物理连线,如电缆或导线。属性包括连接的名称、类型、长度、截面积、材料等。

电网CIM/E文件通常包含电网的详细模型数据,这些数据可以用于构建电网的图模型。CIM/E文件是一种用于电力系统数据交换和模型共享的标准化数据模型,它定义了电力系统组件及其相互关系的统一表示方式,以便在不同的系统和应用程序之间共享信息。

3.3 碳流计算的图算法设计

3.3.1 碳流计算的图模型

在碳流计算中,为了提高计算性能,对电网图模型进行了一定的简化,同时保留了必要的信息。在节点方面,只保留了发电机和母线。发电机代表了电力系统中的发电设备,而母线则代表了供电网络中的节点。这样的简化使模型能够聚焦于发电和供电节点之间的连接关系,更好地揭示碳流的路径和相关性。在边方面,发电机至母线的电流传输路径以及母线与母线间的电流传输路径均以支路表示。图模型设计如图1所示。

通过这样的简化设计,模型能够避免预先计算潮流状态,直接使用量测值进行碳流计算。这意味着在计算碳流时,不需要提前计算电力系统的潮流状态,而是根据实时的潮流量测值进行计算。这样的处理方式不仅提高了计算性能,还能够更好地应对电力系统中变化和不确定性的挑战。

3.3.2 碳流计算的图算法流程

依据电力碳排放流递推算法理论,电力系统中的节点碳强度数值上等于所有流入节点的支路的碳流密度关于有功潮流的加权平均。在所有流入节点的潮流与碳流密度(碳流)给定的情况下,流出潮流的碳流密度与支路无关,均为定值,如图2所示。

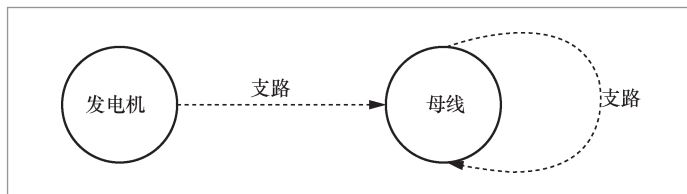


图1 碳流计算的图模型设计

依据该理论,构建图计算的计算流程(如图3所示)。首先,需要构造厂站节点表以及厂站之间碳流关系表,其中节点表包含节点ID、节点名称、初始碳强度字段,关系表包含from_key(碳流流出节点ID)、to_key(碳流流入节点ID)、pd(节点间有功功率传递值),读入节点、关系表,并基于图计算引擎进行碳流传递迭代计算,具体如下。

(1) 读取节点表、关系表,构造vertex、edge对象,并初始化迭代次数 n ;

(2) 基于vertex、edge对象构建graph;

(3) 若迭代次数小于 n ,则执行第(4)步,否则执行第(5)步;

(4) 基于聚合函数进行碳流传递更新,更新计算式为:

$$CD_{tk} = \frac{\sum_{i=1}^n CD_{tk_i} \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

其中, CD_{tk} 表示to_key节点计算后碳强度; CD_{tk_i} 表示第 i 个from_key节点的碳强度; n 表示指向to_key节点的from_key节点个数; P_i 表示第 i 个节点的有功功率。

(5) 碳流传递结果落地入库。

3.4 碳强度传统矩阵计算算法

在处理碳强度计算这样的问题时,可以使用矩阵运算来表示节点之间的碳流传递关系。这种表示方法通常涉及邻接矩阵和迭代方程。首先,定义几个关键元素。

- N 表示节点数量(在本案例中是70 000个节点)。

- A 表示该电力系统的邻接矩阵,大小为 $N \times N$ 。如果节点 i 到节点 j 存在碳流关系,则 A_{ij} 表示节点 i 流向节点 j 的碳强度系数。否则 $A_{ij}=0$ 。

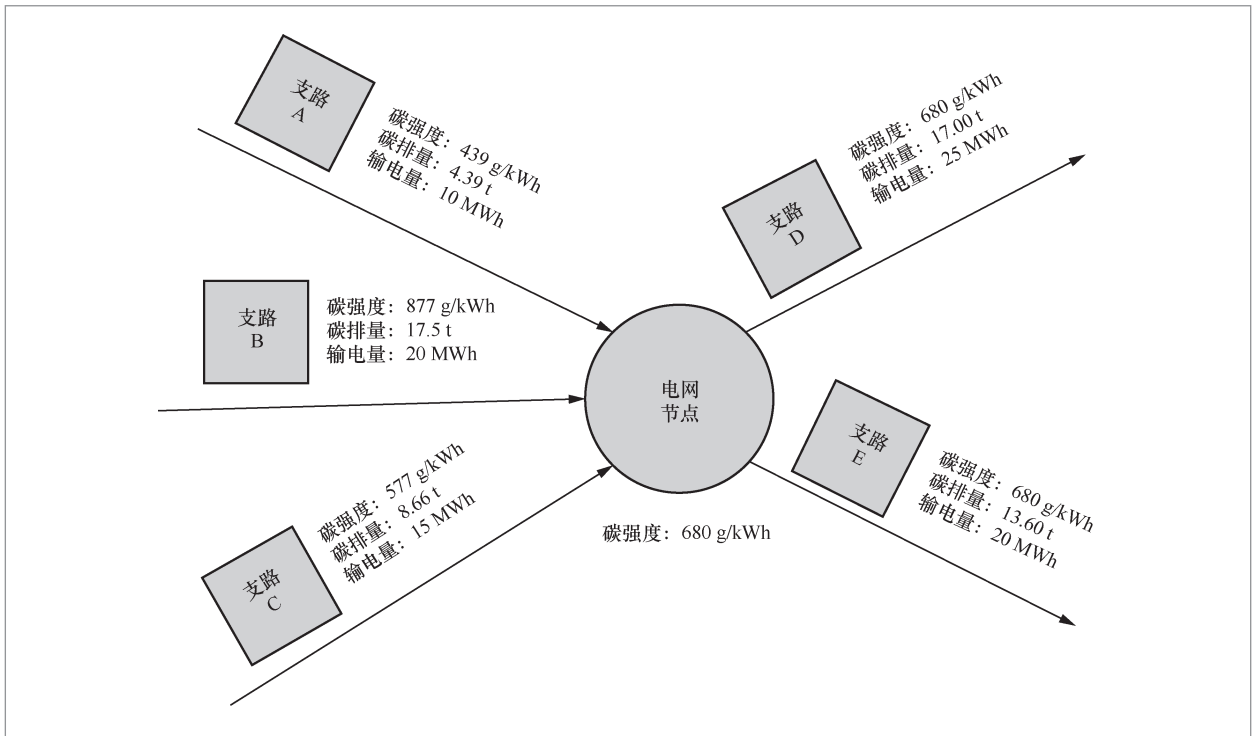


图 2 碳排放流递推算算法示意图

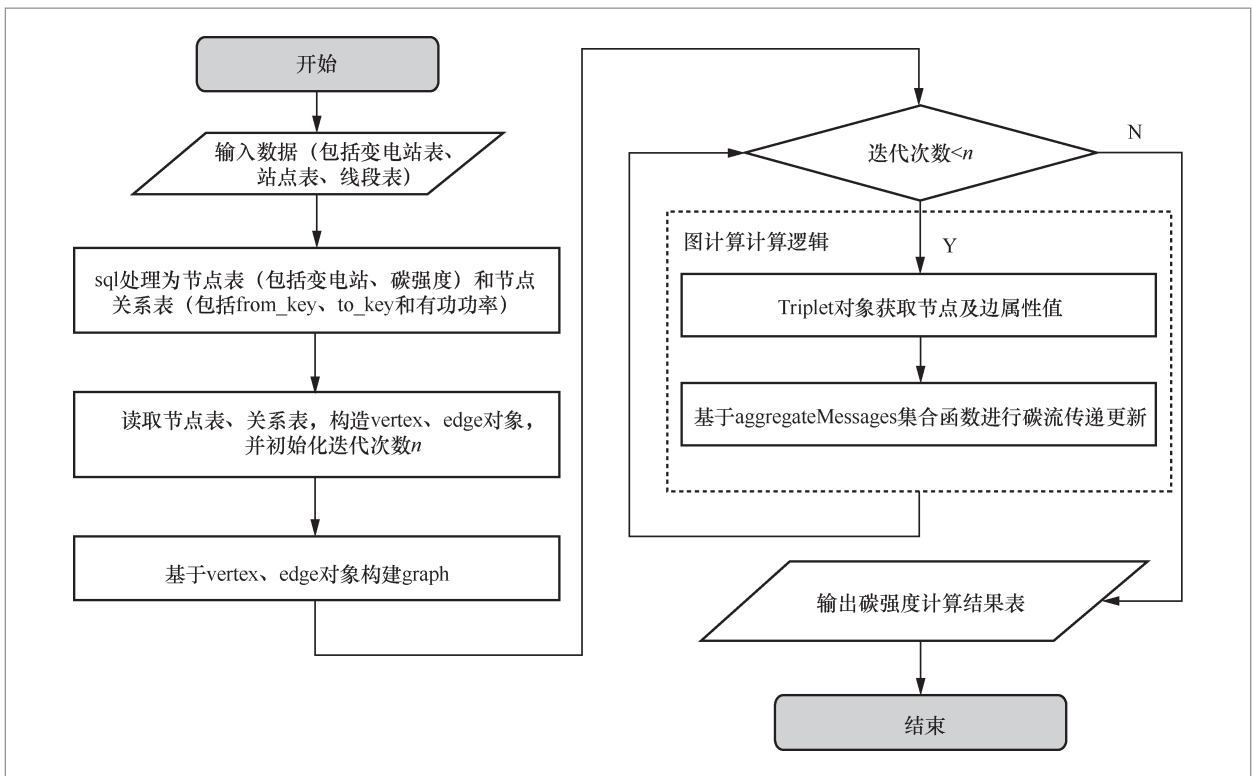


图 3 碳强度算法流程

- P 表示节点间的有功功率传递值矩阵,大小也是 $N \times N$ 。 P_{ij} 表示从节点 i 传递到节点 j 的有功功率。

- e 表示节点 i 到节点 j 的碳流传递,大小为 $N \times N$ 。

- C 表示节点的碳强度矩阵,初始时大小为 $N \times 1$ 。 C_i 表示为节点初始碳强度。则发电侧的碳排放像用户侧转移的过程,可以采用矩阵迭代的方式进行表示:

$$C_{i+1} = \sum e_{ij} C_j \quad (3)$$

计算中,根据电网规模选择合适的迭代次数。

3.5 实验分析

选择ACTIVSg70K数据集作为本次实验的验证数据集,该数据集为包含70 000个母线节点、88 207支路边的电力系统测试用例,完全是合成的,基于公共信息和对实际电源系统的统计分析构建,与实际电网没有任何关系。数据集的部分节点拓扑关系如图4所示,其中红色的节点为发电机节点,绿色的节点为母线节点,母线节点间存在一条或多条支路连接。

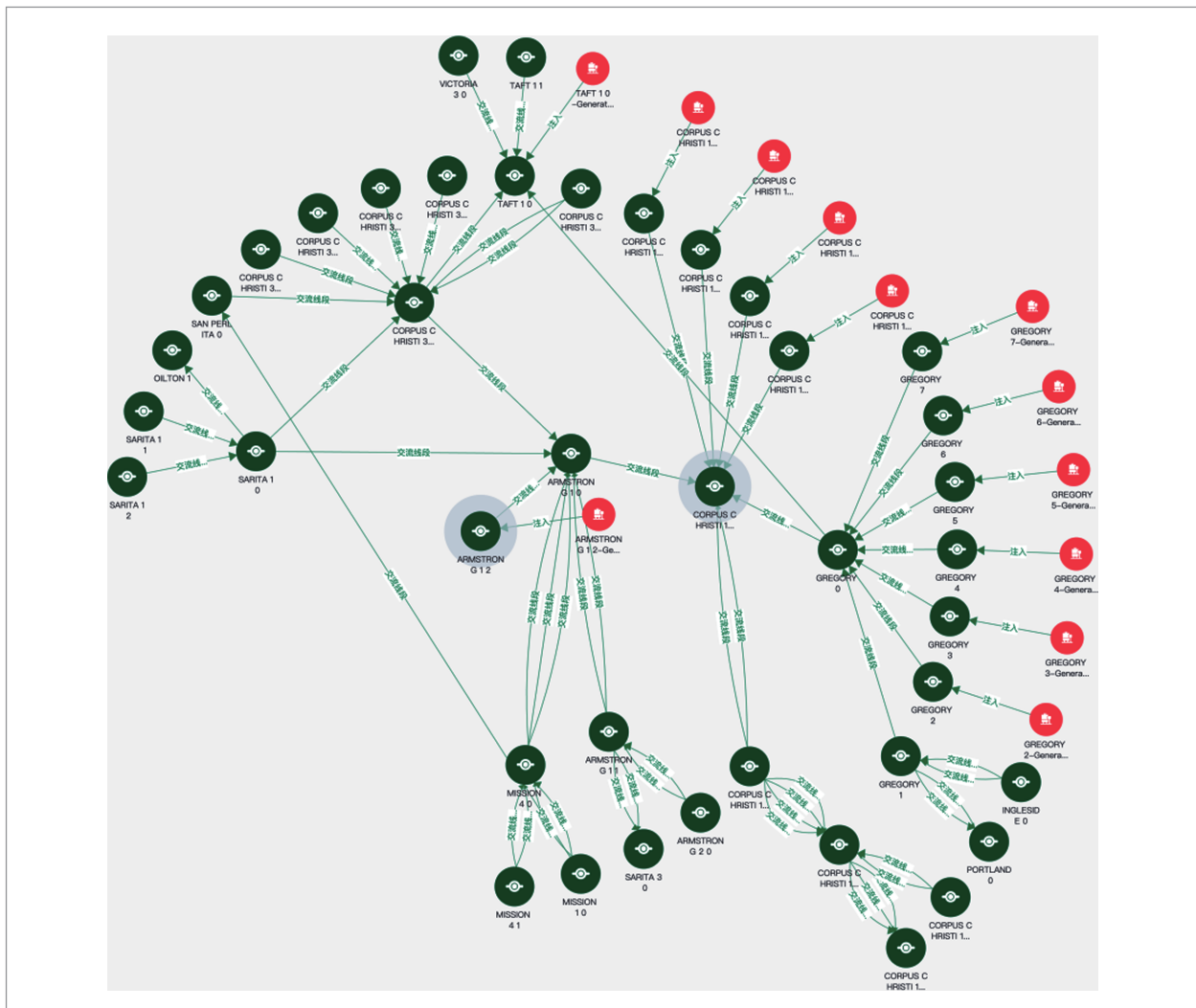


图4 数据集的部分节点拓扑关系

3.5.1 测试环境

实验主机的配置如下。CPU为Intel(R) Xeon(R) Silver 4216 CPU @ 2.10 GHz (64线程), 内存为128 GB。

3.5.2 实验结果

(1) 基于图算法的碳流计算

基于图算法的碳流计算中, 电网拓扑数据及初始碳强度加载进入图数据库, 进行碳流计算时, 将图数据库数据加载至内存图计算系统, 并进行计算。

① 从图数据库将图加载到内存图计算系统的耗时: 147.074 ms。

② 单线程版碳强度计算耗时(迭代10次): 52.136 ms, 总耗时199.21 ms。

③ 多线程版碳强度计算耗时(迭代10次): 47.377 ms, 总耗时194.451 ms。

(2) 基于矩阵的碳流计算

模拟数据从关系型数据库中读取数据, 并构建邻接矩阵, 然后进行矩阵计算。

① 矩阵构造耗时961.586 s, 其中e矩阵存储规模达到18.3 GB;

② 矩阵相乘(迭代10次)耗时16.85 s。

3.5.3 优势介绍

上述迭代计算的过程可抽象为对图中点及点的邻边、邻点进行不断遍历的过程, 这正是图计算所擅长的操作。AtlasGraph的图计算系统针对这类图计算经典操作进行了深度的系统优化, 具体如下。

- 采用了无索引近邻(index-free adjacency)的数据结构, 对任意一个点数据的访问无需进行索引查询, 可在 $O(1)$ 时间复杂度内快速完成。

- 采用了压缩矩阵行存和列存的数据

结构来存储点边拓扑结构。真实业务场景中的图往往是极度稀疏的, 采用普通的数据结构存储会带来很大的内存空间的浪费(在实验中, 7 000节点系统构造邻接矩阵占用存储规模达到18.3 GB)。而稀疏矩阵的存储方式一方面可以极大降低内存开销, 同时还具有极高的内存访问效率, 从而可以实现快速的点边遍历操作。

- 支持单线程和多线程两种执行方式。对于多线程执行, 支持动态的任务调度。

4 结束语

4.1 图数据库与图算法在电力系统碳流计算中的优势

通过本次研究发现图数据库与图算法在电力系统碳流计算中展现出显著的优势。首先, 它们能够显著提升计算效率, 通过图数据库存储电力系统的详细拓扑结构和运行数据, 利用图算法追踪电力流和相应的碳流, 从而快速分析不同时间段和运行状态下的碳排放情况。其次, 图算法能更好地模拟电力系统中各个组件之间的相互关系, 有助于提高碳流计算的准确性。此外, 图数据库和图算法可以实时监测和报告碳排放数据, 为政策制定者、电力企业和公众提供透明信息, 从而提高碳排放的管控和责任意识。最后, 图数据库和图算法天生支持分布式存储和计算, 能够适应大数据量下的高效运算需求, 同时, 图算法可以实现对电力系统中各个节点的并行计算, 每一步计算不受上一步的影响, 从而提高了计算效率和可扩展性。

4.2 对工业大规模矩阵运算问题的启示

图数据库与图算法在电力系统碳流计

算中展现出了显著的效率和准确性优势,以及良好的可扩展性,这为工业大规模矩阵运算问题提供了重要的启示。随着工业规模的不断扩大和计算复杂度的增长,图数据库和图算法有望在更多工业领域发挥重要作用,如物流管理、通信网络设计等。本研究为其他工业领域提供了借鉴意义,特别是对于供应链管理、无线通信网络优化等涉及大规模矩阵运算的问题,利用图数据库和图算法可以提高计算效率和准确性。

4.3 研究局限与未来工作展望

4.3.1 研究的局限性

本研究存在一定的局限性。首先,数据集的限制是本研究的主要局限之一。笔者仅针对某一特定数据集进行了实验,因此结果可能受到数据集特性的影响。在未来的研究中,应考虑扩展数据集的范围,以验证图数据库和图算法在更多场景下的适用性。其次,算法的局限性也是本研究的局限之一。本文使用了特定的图算法进行实验,但这些算法可能存在一定的局限性。在未来的研究中,可以尝试探索其他图算法,以进一步提高计算效率和准确性。

4.3.2 研究的方向性

本文针对特定数据集,探讨了图数据库和图算法在电力系统中的应用,虽然取得了一定的成果,但仍存在一些局限性,如数据集的限制和算法的局限性等。为了进一步拓展和完善本文的成果,未来的研究可以从以下几个方面展开。

首先,扩展数据集和算法的应用范

围。在未来的研究中,可以尝试在不同规模、类型的电力系统数据集上验证图数据库和图算法的有效性。此外,还可以探索图数据库和图算法在其他工业领域中的应用,如供应链管理、通信网络优化等。这将有助于更全面地了解图数据库和图算法在不同场景下的表现,为相关领域的研究和实践提供更可靠的参考。

其次,探索图数据库与图算法在其他工业领域的应用。除了电力系统,许多其他工业领域也存在大规模矩阵运算问题。在未来的研究中,可以尝试将图数据库和图算法应用于这些领域,以评估其应用前景和优势。这将有助于更好地了解图数据库和图算法在工业界的潜力,推动其在更多场景下的应用。

参考文献:

- [1] PARTER S. The use of linear graphs in Gauss elimination[J]. SIAM Review, 1961, 3(2): 119-130.
- [2] ROSE D J. A graph-theoretic study of the numerical solution of sparse positive definite systems of linear equations[M]// Graph theory and computing. Amsterdam: Elsevier, 1972: 183-217.
- [3] ROSE D J, TARJAN R E, LUEKER G S. Algorithmic aspects of vertex elimination on graphs[J]. SIAM Journal on Computing, 1976, 5(2): 266-283.
- [4] ROSE D J, TARJAN R E. Algorithmic aspects of vertex elimination on directed graphs[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 1978, 34(1): 176-197.
- [5] REID J K. Large sparse sets of linear equations[M]. New York: Academic Press, 1971.
- [6] ROSE D J, WILLOUGHBY R A. Sparse matrices and their applications; proceedings[M]. New York: Plenum

- Press, 1972.
- [7] DUFF I S. A sparse future[M]. New York: Academic Press, 1981: 1-29.
- [8] EVANS D J. Sparsity and its applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [9] TEWARSON R P. Sparse matrices[M]. New York: Academic Press, 1973.
- [10] PISSANETZKY S. Sparse matrix technology[M]. London: Academic Press, 1984.
- [11] GEORGE A, LIU J W H. Computer solution of large sparse positive definite systems[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981.
- [12] DAVIS T A. Direct methods for sparse linear systems[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006.
- [13] DUFF I S, ERISMAN A M, REID J K. Direct methods for sparse matrices (2nd ed.)[M]. Oxford: Oxford University Press, 2017.
- [14] KEPNER J V, GILBERT J R. Graph algorithms in the language of linear algebra[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2011.
- [15] AHO A V, HOPCROFT J E, ULLMAN J D. Data structures and algorithms[M]. Reading: Addison-Wesley, 1983.
- [16] TARJAN R E. Data structures and network algorithms[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1983.
- [17] TARJAN R. Depth-first search and linear graph algorithms[C]//Proceedings of the 12th Annual Symposium on Switching and Automata Theory. Piscataway: IEEE Press, 1971: 114-121.
- [18] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
ZHOU T R, KANG C Q, XU Q Y, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [19] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
ZHOU T R, KANG C Q, XU Q Y, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
- [20] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 39-44.
ZHOU T R, KANG C Q, XU Q Y, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44.
- [21] 袁书林, 马瑞. 基于电力系统碳排放流理论的碳排放分摊模型研究[J]. 现代电力, 2014, 31(6): 70-75.
YUAN S L, MA R. A research on the allocation model of carbon emission in power system based on carbon emission flow theory[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(6): 70-75.
- [22] 汪锋, 豆南南, 喻冬梅. 基于电力系统碳排放流的分省化石能源消费CO₂排放量测算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 105-112.
WANG F, DOU N N, YU D M. Measurement of provincial CO₂ emission from fossil energy consumption based on carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 105-112.
- [23] 马瑞, 袁书林, 秦泽宇. 考虑风电不确定性的电力系统碳排放流分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 124-129.
MA R, YUAN S L, QIN Z Y. Analysis on carbon emission flow of power system with uncertain wind power injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 124-129.
- [24] 龚昱, 蒋传文, 李明炜, 等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放计量[J]. 电力系统自

动化, 2014, 38(17): 113-117.

GONG Y, JIANG C W, LI M W, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117.

[25] 张孝顺, 郑理民, 余涛. 基于多步回溯 $Q(\lambda)$ 学习的电网多目标最优碳流算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 118-123.

ZHANG X S, ZHENG L M, YU T. Multi-objective optimal carbon emission flow calculation of power grid based on multi-step $Q(\lambda)$ learning algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 118-123.

[26] 康重庆, 程耀华, 孙彦龙, 等. 电力系统碳排放流的递推算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 10-16.

KANG C Q, CHENG Y H, SUN Y L, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 10-16.

[27] 范宏, 汤亚宸, 刘广一, 等. 基于图计算的电力碳强度优化仿真方法[J]. 供用电, 2022, 39(10): 10-16.

FAN H, TANG Y C, LIU G Y, et al. Electricity-carbon intensity optimization simulation method based on graph calculation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10): 10-16.

作者简介



朱广新(1981-),男,国家电网有限公司大数据中心教授级高级工程师,主要从事电力数字化建设、电力大数据分析应用等工作,科研成果多次获得国家电网公司科技进步奖一/二等奖。



周春雷(1980-),男,国家电网有限公司大数据中心高级工程师,主要从事电力大数据、信息化建设工作。



李俊妮(1982-),女,国家电网有限公司大数据中心中级经济师,主要从事能源大数据应用和标准工作。



宋继勳(1981-),男,国家电网有限公司大数据中心高级工程师,主要从事数字化建设、能源大数据管理及应用等工作。



史昕(1991-),女,国家电网有限公司大数据中心高级工程师,主要从事电力大数据应用、电力系统分析等工作。



沈子奇(1985-),男,国家电网有限公司大数据中心高级工程师,主要从事大数据管理、数据分析应用、能源大数据中心等专业领域工作。

收稿日期: 2024-02-08

基金项目: 国网大数据中心科技项目(No. SGSJ0000SJS2100158)

Foundation Item: Technology Project of State Grid Big Data Center (No. SGSJ0000SJS2100158)