

基于 GPU 加速的大规模系统 $N-1$ 安全校验中 电网连通性的检验方法

唐坤杰¹, 董树锋^{1*}, 宋永华², 朱炳铨³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 澳门大学, 澳门特别行政区 999078;
3. 国网浙江省电力公司, 浙江省 杭州市 310007)

GPU-based Acceleration Algorithm of Connectivity Test in $N-1$ Security Check for Large-scale Systems

TANG Kunjie¹, DONG Shufeng^{1*}, SONG Yonghua², ZHU Bingquan³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 2. University of Macau, Macau 999078, China; 3. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: With the expansion of power systems, there is a significant increase in calculation quantity of the process of $N-1$ security check. In order to satisfy the increasing real-time requirements of $N-1$ security check, a graphics processing unit (GPU)-based acceleration algorithm of connectivity test in $N-1$ security check for large-scale systems was proposed. According to graph theory, the grid model was abstracted as a graph model, and then abstracted as a bio-directional vector graph model. Based on vector summation method, criterion of power grid connectivity was achieved in the vector graph model, and algorithm of connectivity test was designed. The case analysis shows that, the proposed algorithm has high efficiency and small memory footprint. It has significant advantages compared with traditional methods for connectivity test, which can effectively improve the speed of power grid connectivity test. Furthermore, it can help to improve the overall efficiency of $N-1$ security check in large-scale systems, and has engineering application value.

KEY WORDS: $N-1$ security check; connectivity test; vector summation method; GPU; parallel computing

摘要: 随着电力系统规模的扩大, $N-1$ 安全校验过程的计算量也显著提升。为了适应 $N-1$ 安全校验日益上升的实时性需求, 提出一种基于图形处理器(graphics processing unit, GPU)加速的大规模系统 $N-1$ 安全校验中电网连通性的检验方法。根据图论思想, 电网模型被抽象为图模型, 进而抽象为双向向量图模型。基于向量求和的思想在向量图模型上得到电网连通性判别条件, 进行设计连通性检验算法。算例测试表明, 所提算法效率高, 空间占用小, 与传统的连通性检验算法相比具有明显优势, 能够有效提高系统 $N-1$ 安全校验中电网连通性检验的速度, 进而有助于大规模电网 $N-1$

安全校验整体计算效率的提升, 具有工程应用的价值。

关键词: $N-1$ 安全校核; 连通性检验; 向量求和法; GPU; 并行计算

0 引言

电力系统静态安全分析, 实质就是根据 $N-1$ 原则, 对于系统中每一个单一元件如变压器、线路等开断的情形下进行电网结构与运行方式、线路潮流等方面的校核。电网的连通性检验是 $N-1$ 安全校核的重要环节, 也是潮流计算的先序步骤。通过连通性检验可以获得在不同元件开断情况下电网的整体拓扑结构, 即全网连通或解列为子网, 为后续的计算提供基础。

系统规模较小时, $N-1$ 安全校核中的电网连通性检验运算量相对较少, 对 $N-1$ 安全校核的整体的计算效率影响不大, 传统的各类连通性检验算法一般可以满足需求, 因此在先前的研究中, 改进 $N-1$ 校核中的连通性检验算法的成果比较有限。

随着省地一体化的进程不断加深, 系统规模显著增大, 这使得连通性检验的运算量显著增大, 它的运算效率也将直接影响到 $N-1$ 安全校验的整体计算效率。因此, 研究快速的大规模系统 $N-1$ 安全校核中电网连通性检验的算法具有重要的现实意义。

众多基于图论的算法被运用来解决电网的连通性检验。第 1 类方法基于搜索技术, 主要包括深度优先搜索^[1]、广度优先搜索^[2-5]和人工智能搜索^[6], 算法直观、易操作, 但计算效率低, 对于大规模系

统不适用。第2类方法是基于邻接矩阵进行连通性检验^[7-11],包括邻接矩阵自乘法^[7-9]、行累加算法^[11]等,易于实现,但是邻接矩阵一般采用稠密矩阵方式存储,存储空间占用大,对于电力系统中的大型稀疏网络不适用。此外,还有一些研究提出了扩充连接节点法^[12]、节点标记法^[13]等方式进行高效的电网连通性检验。但是,这些算法的实现均主要基于串行架构,对于大批量的连通性检验问题,需要依次进行连通性检验,或依次进行局部修正,总体效率仍比较低,并行计算的思想和方法还没有得到充分应用。

近年来,NVIDIA公司推出并行架构CUDA并不断完善,图形处理器(graphics processing unit, GPU)通用计算也逐渐被运用到包括电力系统在内的诸多科学计算领域^[14-19],用于并行处理逻辑简单但规模庞大的运算。在图论的连通性检验算法相关研究中,文献[4]基于GPU实现了变种的广度优先搜索,文献[20]和[21]分别基于GPU和分布式并行算法实现Shiloach-Vishkin算法的修正和优化。但是,这些成果未被充分应用到电网的连通性检验中,且这些算法的并行聚焦于单一问题的具体步骤,而对于大批量的连通性检验问题之间的并行未作考虑。

结合以上问题,本文的主要工作包括:

1) 提出一种用双向向量抽象电网结构的模型,同时利用数学中向量运算的原理和思想,提出了基于“向量求和法”的电网连通性成立条件。

2) 基于“向量求和法”思想,提出一种新型的电网连通性检验算法,其时间复杂度和空间复杂度显著小于传统算法,如搜索法、邻接矩阵自乘法等等。

3) 以“向量求和法”为基础,提出一种基于GPU并行化加速的大规模系统N-1安全校核中电网连通性的检验方法。

算例测试表明,本文提出的算法是一种适用于大规模电网N-1安全校核中批量结构连通性检验的高效算法,具有显著的加速效果,可以满足安全分析和辅助决策的实时性需求。同时,这一算法内存占用低,普通PC机的CPU和GPU即可支持。

1 电网连通性检验问题的建模

由于切机不影响网络结构,故在N-1安全校核中的连通性检验中只需要考虑线路和变压器支路,

对于给定网络结构中的每一条支路依次开断的情形进行网络整体结构的分析,得到全网连通或解列为子网的结果,为后续的计算提供基础。也就是说,对于具有K条线路或变压器支路的网络,需要执行K次检验。

电网模型一般可以根据图论抽象为“图”。“图”可以通过二元组定义^[22],即图G是一个有序二元组(V, E),其中V称为顶点集, E称为边集。其中E的元素也是二元组,可以用(x, y)表示, x, y ∈ V。图1(a)是一个电网模型示例^[23]。在对电网模型进行抽象时,忽略发电机和负荷,以节点为“图”的顶点,以线路和变压器支路为“图”的边,可抽象出如图1(b)所示的“图”。

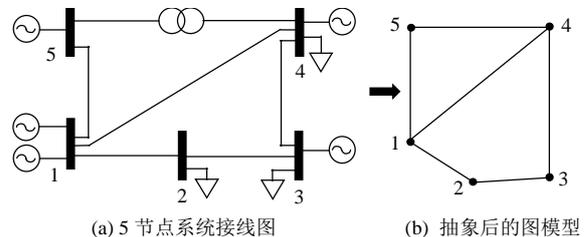


图1 一个5节点系统模型及其抽象后的图模型

Fig. 1 Model of a 5-bus system and abstract graph model
一般地, n 节点、m 条线路或变压器支路的电网模型,经上述方法抽象后对应的图G的二元组定义可以表达为:

$$G = (V, E) \quad (1)$$

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_n) \quad (2)$$

$$E = (E_1, E_2, \dots, E_m) \quad (3)$$

$$E_k = (x_k, y_k), \quad 1 \leq k \leq m, x_k \in V, y_k \in V \quad (4)$$

2 向量求和法的基本思想和算法实现

2.1 利用向量表示的图模型

按照上述方法抽象的图模型是一个无向图,即图中的每一条边都是无方向的。因此,可以将图1(b)中的每一条边改为两个方向相反的向量进行表示,如图2所示。

相应地,图G定义中的式(4)可以表示为

$$E_k = (\vec{p}_{x_k y_k}, \vec{p}_{y_k x_k}), \quad 1 \leq k \leq m, x_k \in V, y_k \in V \quad (5)$$

式中 $\vec{p}_{x_k y_k}$ 表示从第k条边所连接的顶点 x_k 指向顶点 y_k 的向量。

用S表示图G的向量集合:

$$S = (\vec{p}_{x_1 y_1}, \vec{p}_{y_1 x_1}, \dots, \vec{p}_{x_m y_m}, \vec{p}_{y_m x_m}) \quad (6)$$

根据图论中对于连通性的定义,此时连通性成立条件可以表达为

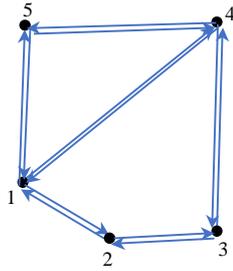


图 2 利用向量表示的图模型

Fig. 2 Graph model represented by vectors

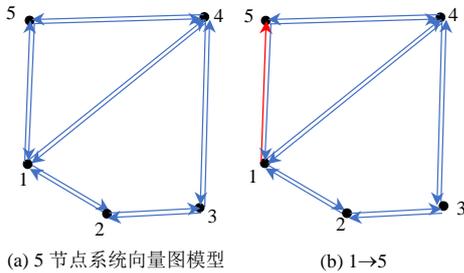
$$\forall V_i, V_j \in V (i \neq j), \exists S_0 \subseteq S, \sum_{\vec{p} \in S_0} \vec{p} = \vec{p}_{V_i V_j} \quad (7)$$

2.2 模型的简化

为了进一步简化问题，可以将连通性成立条件改写为

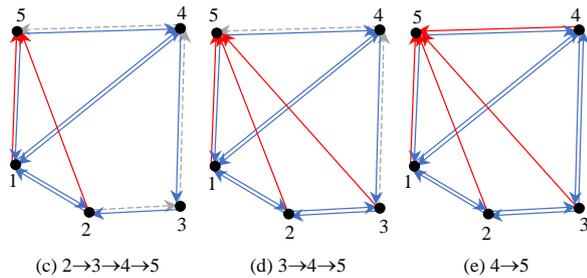
$$\forall V_i \in V (i \neq n), \exists S_0 \subseteq S, \sum_{\vec{p} \in S_0} \vec{p} = \vec{p}_{V_i V_n} \quad (8)$$

以上文提到的 5 节点系统为例，对于抽象后的图 3(a)中的顶点 1、2、3、4，分别能找到一个向量集合，使得集合内向量求和等于从该顶点指向顶点 5 的向量，如图 3(b)–(e)所示。故根据连通性成立条件，可以判断此图是连通的，这与实际情况相符。



(a) 5 节点系统向量图模型

(b) 1→5



(c) 2→3→4→5

(d) 3→4→5

(e) 4→5

图 3 向量求和法的模型验证

Fig. 3 Model verification of vector summation method

2.3 模型简化的正确性证明

要证明连通性成立条件由(7)简化为(8)的正确性，即证明条件(8)是条件(7)的充分条件。

若条件(8)成立，则有：

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall V_i, V_j \in V (i \neq n, i \neq j, j \neq n), \\ \exists S_i = \{\vec{p}_{i_2 i_1}, \vec{p}_{i_3 i_2}, \dots, \vec{p}_{i_k i_{k-1}}\} \subseteq S, \sum_{\vec{p} \in S_i} \vec{p} = \vec{p}_{V_i V_n} \\ \exists S_j = \{\vec{p}_{j_1 j_2}, \vec{p}_{j_2 j_3}, \dots, \vec{p}_{j_{m-1} j_m}\} \subseteq S, \sum_{\vec{p} \in S_j} \vec{p} = \vec{p}_{V_j V_n} \\ i_1, i_2, \dots, i_k, j_1, j_2, \dots, j_k \in V \end{array} \right. \quad (9)$$

由于 S 集合中的元素是成对出现的，即方向相反的向量同时出现在 S 中，故可以构造：

$$S'_j = \{\vec{p}_{j_2 j_1}, \vec{p}_{j_3 j_2}, \dots, \vec{p}_{j_m j_{m-1}}\}, \sum_{\vec{p} \in S'_j} \vec{p} = \vec{p}_{V_n V_j} \quad (10)$$

若：

$$S'_j \cap S_i = \emptyset \quad (11)$$

则有：

$$S_{i \cup j} = S_i \cup S'_j, S_{i \cup j} \in S, \sum_{\vec{p} \in S_{i \cup j}} \vec{p} = \vec{p}_{V_i V_j} \quad (12)$$

若式(11)不成立，假设：

$$t_1, t_2 \in V, \vec{p}_{t_1 t_2} \in (S'_j \cap S_i) \quad (13)$$

则：

$$\exists S''_j \in S'_j, \sum_{\vec{p} \in S''_j} \vec{p} = \vec{p}_{t_2 V_j} \quad (14)$$

令 $S'_j = S''_j$ ，然后再次进行条件(11)的判断，若不成立则继续反复按式(13)、(14)的方法进行操作，直至条件(11)满足，最终得到式(12)式中的 $S_{i \cup j}$ 。

因此，由(8)–(14)可得：

$$\forall V_i, V_j \in V (i \neq j), S_0 = S_{i \cup j} \subseteq S, \sum_{\vec{p} \in S_0} \vec{p} = \vec{p}_{V_i V_j} \quad (15)$$

综上所述，条件(8)成立时，条件(7)必然成立，即条件(8)是条件(7)的充分条件。

2.4 向量求和法的算法实现

为方便起见，式(16)满足时，可称顶点 V_i 可达顶点 V_j 。

$$V_i, V_j (i < j), \exists S_0 \subseteq S, \sum_{\vec{p} \in S_0} \vec{p} = \vec{p}_{V_i V_j} \quad (16)$$

根据简化后的模型中的连通性判别条件，可以设计如下算法。其中，每个顶点的 post 值表示当前该顶点可达的其他顶点中序号最大的序号值。

步骤 1：对于所有顶点 i ，令 $post[i]=i$ 。

步骤 2：对于每一条边 k ，连接顶点 x_k 和 y_k ，

令 $post[x_k], post[y_k]=\max\{post[x_k], post[y_k]\}$ 。

步骤 3：若完成步骤 2 的过程中任意顶点 i 对应的 $post[i]$ 都未更新，即对于任意一条边 k ，都有 $post[x_k]=post[y_k]$ ，则进入步骤 4，否则回到步骤 2。

步骤 4：若对于所有顶点 i ，均有 $post[i]=n$ ，则此图是连通的，否则是不连通的。同时，当图不连通时，对于 post 值相同的顶点及连接这些顶点的边所组成的子图是连通的，即存在多个连通子图时，post 值相同的顶点属于同一个子图，post 值不相同的顶点属于不同的子图。

2.5 算法时空复杂度分析

根据上述算法的步骤可知，算法的效率主要受顶点和边的规模、图的结构、边的遍历顺序等因素影响。实际的电网中每个节点连接的线路或变压器支路数目总体比较均衡，相应地抽象出的图的各个顶点的度也比较均衡。此时，若支路遍历顺序认为是随机的，对于式(1)—(4)描述的图，通过实际算例分析，算法的平均时间复杂度约为 $O(m\log(\log n)) \sim O(m\log n)$ 。

在空间复杂度方面，由于图的存储形式用二元组方法，且边的存储也使用二元组对，在图规模较大，且结构比较稀疏时，即 $m \ll n(n-1)/2$ ，能够显著节省存储空间。同时，算法中额外的存储空间 $post$ 数组是一维的，长度与顶点数一致。故算法整体的空间复杂度为 $O(n)$ 。

3 基于GPU加速的N-1校验中电网连通性检验方法

3.1 CUDA模型及其基本原理

CUDA(compute unified devices architecture)是NVIDIA公司2007年推出的一种新的编程模型和指令集架构，为GPU通用计算的实现提供了支持。在CUDA的框架下，用户可以定义特别的函数称为“内核”^[24]。每一个内核函数在调用时占用一个Grid(线程网络)，每个线程网络由多个Block(线程块)组成，各线程块之间并行执行，线程块之间无法通信。每一个线程块又包含多个Thread(线程)，各线程之间并行执行^[25]。调用内核函数时，通过设定启用的线程块数量及每个线程块中使用的线程数量，可以使得每个线程对于不同的数据并行执行相同的指令。

3.2 基于GPU的算法实现

在N-1校核的过程中，需要对每一条线路、变压器支路分别开断时的各个网络结构进行连通性检验。而这些问题彼此是独立的，故具有自然可并行性。同时，由于2.3节中设计的算法逻辑简洁，算法效率高，便于并行。因此，考虑将N-1校核过程中的若干连通性检验问题利用GPU实现并行处理，进一步提高计算效率。

算法1 基于GPU并行的N-1校核连通性检验算法

```

for i = 1 : n do // n 为节点个数
  for j = 1 : m do // m 为支路数
    post(j, i) = i; // 为 post 设置初值
  end for
end for

```

Call Connectivity_Test <<<m, 1>>> (post, m);
 // m 为支路数。调用内核函数，启动 m 个线程块，每个线程块启动 1 个线程，这些启动的线程将并行执行。第 r 个线程块中的线程处理第 r 条线路或变压器支路开断时的连通性检验，如图4所示。

```

Connectivity_Test(Input: post, m; Output: post)
  r = blockIdx.x;
  // blockIdx.x 表示此条线程所属的线程块序号
  do
    flag = true;
    //所有 post(r) 的值均不再更新时退出循环
    for k = 1 : m do
      if r = k then continue;
      //此条线程所属的线程块序号为 r，故认为第 r 条支路开断，操作方法是直接进入下一步循环，忽略此条支路
      if post(r, x(k)) = post(r, y(k)) then flag = false;
      post(r, x(k)) = max{post(r, x(k)), post(r, y(k))};
      post(r, y(k)) = post(r, x(k));
      // x(k)和 y(k)表示第 k 条支路相连的两个节点的序号
    end for
  loop until flag = true
  if every value of post(r) is equal to n
    then the r-th graph is connected
  else the r-th graph is not connected
  end if

```

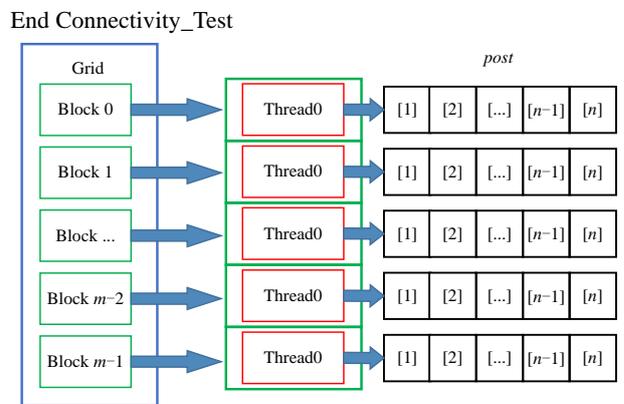


图4 N-1安全校核中批量连通性检验问题的并行处理

Fig. 4 Parallel processing of batched connectivity tests in N-1 security check

3.3 考虑N-1引起动态拓扑变化下的连通性检验

在模拟开断每一条线路、变压器支路时，有时还需考虑由N-1引起的动态拓扑变化对电网整体连通性的影响，为后续模拟开断计算采用因子修正等方法提供基础^[26]。

通过预先建立N-1故障与动作的备自投的映射关系，可对每一个N-1情形下的备自投动作进行模拟，再在此基础上进行连通性检验。具体实现方式是修改算法1中Connectivity_Test函数，考虑动态拓扑变化，进行必要的预处理。

算法 2 考虑动态拓扑变化下的连通性检验算法

```

Connectivity_Test2(Input:  $post, m$ ; Output:  $post$ )
   $r$  blockIdx.x;
do
   $flag$  true;
  for  $k$  1 :  $m$  do
    if ( $r = k$ ) and ( $r$  not in  $BATS1(r)$ ) then continue;
    //  $BATS1$  是一个集合向量, 表示预先建立的设备备投
    的映射关系。 $BATS1(r)$ 表示一个集合, 集合元素为支路序号,
    即第  $r$  条支路开断时满足动作条件的设备备投的支路序号
    的集合。
    if  $post(r, x(k)) = post(r, y(k))$  then  $flag$  false;
     $post(r, x(k)) = \max\{post(r, x(k)), post(r, y(k))\}$ ;
     $post(r, y(k)) = post(r, x(k))$ ;
  end for
  for ( $k_1, k_2$ ) in  $BATS2(r)$  do
    //  $BATS2$  是一个集合向量, 表示预先建立的母联备投的
    映射关系。 $BATS2(r)$ 表示一个集合, 每个集合元素为两个不
    同节点序号组成的二元组, 即第  $r$  条支路开断时满足动作条
    件的母联备投的集合。
    if  $post(r, k_1) = post(r, k_2)$  then  $flag$  false;
     $post(r, k_1) = \max\{post(r, k_1), post(r, k_2)\}$ ;
     $post(r, k_2) = post(r, k_1)$ ;
  end for
loop until  $flag$  true
if every value of  $post(r)$  is equal to  $n$ 
  then the  $r$ -th graph is connected
  else the  $r$ -th graph is not connected
end if
End Connectivity_Test2

```

不难看出, 修正之后的算法 2 在时间复杂度上与原算法一致, 且不破坏并行性。利用 GPU 仍然可以并行实现批量的连通性检验问题。

3.3 算法特点

1) 算法可以对于 $N-1$ 校核过程中的独立的连通性检验问题进行并行处理, 平均时间复杂度仍能维持在 $O(m \log(\log n)) \sim O(m \log n)$ 。对于每一个独立问题, 都需要对一维数组 $post$ 进行维护, 算法的整体空间复杂度为 $O(nm)$ 。因此, 算法的时空复杂度均比较低, 对于大规模系统有很好的适用性。

2) 算法在对批量的网络结构进行连通性检验的同时, 可以划分出连通子图, 对应到电网模型中即为连通的子网, 这一信息也为后续的安全校核提供了便利。

4 算例分析

为了分析算法的有效性和优越性, 利用 IEEE 标准算例 case118、case300 及 PSS/E 软件自带算例

Coal 2005 NI TP、bench、bench2 进行 $N-1$ 全校核下的连通性检验测试, 对于每条支路分别断开的情形进行检验, 即对于具有 K 条支路的系统, 需要执行 K 次检验。

编译程序所使用的编译器为 Microsoft Visual Studio 2013 Update 3 与 NVIDIA Nsight Visual Studio Edition, 运行在 64bit 的 windows10 操作系统上。测试使用的 CPU 型号为 Intel Core i7-7700K, 运行主频 4.20GHz; 内存为 32GB; GPU 为 NVIDIA GeForce GTX1080, 支持 CUDA8.0 标准。

4.1 算法总体加速效果分析

为了验证本文算法总体计算效率的优越性, 分别测试各算例在本文算法、向量求和法(串行)、邻接矩阵自乘法(并行)、深度优先搜索法(并行)下完成 $N-1$ 校核中所有连通性问题检验的计算用时。表 1 中的数据由这 4 种方法分别进行 10 次取计算用时的平均值得到。

表 1 本文算法与各类传统算法计算用时(ms)对比

Tab. 1 Comparison of time consuming(ms) of algorithm in this paper and other traditional algorithms

算例	节点数	支路数 (检验 次数)	向量求 和法 (并行)	向量求 和法 (串行)	邻接矩 阵自乘法 (并行)	深度优 先搜索法 (并行)
case118	118	186	1	1	2206	6
case300	300	411	2	5	2377	32
Coal 2005 NI TP	474	671	4	20	2571	97
bench	1648	2602	91	434	*	15644
bench2	7917	13014	2084	14633	*	**

注: *表示由于并行的邻接矩阵自乘法空间复杂度较高, 当算例规模较大时, 实验所使用的 GPU 无法满足存储需求; **表示由于深度优先搜索法的计算效率较低, 当算例规模较大时, 不能在有效时间内(120s)计算出结果。

由表 1 可以看出, 本文提出的向量求和法的计算用时显著少于邻接矩阵自乘法和深度优先搜索法这两种传统的连通性检验算法。即使是串行的向量求和法在计算用时也显著少于两种传统方法, 且数据规模越大, 加速效果越明显, 如对于较大规模的算例 Coal 2005 NI TP, 串行的向量求和法用时仅 20ms, 相比并行的邻接矩阵自乘法加速了 120 余倍。可见本文提出的向量求和法计算效率很高。

进一步地, 本文提出了基于 GPU 并行加速的向量求和法。图 5 比较了串行和并行的向量求和法分别用于 $N-1$ 校核中电网连通性检验的计算用时。

由图 5 中的计算时间柱状图和加速曲线可以看出, GPU 加速使得原来串行的向量求和法的计算效率有了明显的提升, 且总体上, 随着计算规模

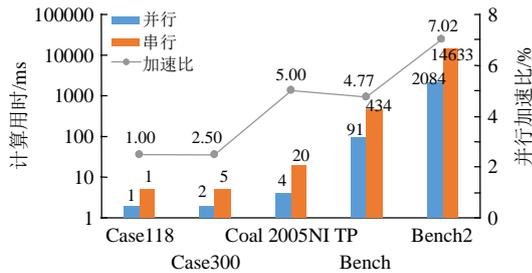


图5 基于GPU的并行算法加速效果分析

Fig. 5 Acceleration effect analysis of the parallel algorithm based on GPU

的增大,加速效果越明显。对于大规模算例 bench2,加速比超过7。由此可见,通过对GPU并行的进一步加速,连通性检验算法的效率能进一步提升,以满足大规模系统 N-1 校核连通性检验的实时性需求。

4.2 内存占用测试

为了检验本文算法的内存占用情况,分别测试各算例在本文算法、向量求和法(串行)、邻接矩阵自乘法(并行)、深度优先搜索法(并行)下完成 N-1

校核中所有连通性问题检验的内存占用峰值,包括RAM存储及GPU缓存两部分。

由表2可以看出,本文算法与各类传统算法在CPU的内存占用方面基本是一致的,但是在GPU缓存方面具有较大差异。具体地,邻接矩阵自乘法计算过程中通过对邻接矩阵的乘法、加法运算后得到的结果矩阵一般是稠密矩阵,绝大多数元素为非零元,特别地,图连通的成立条件即为计算得到的结果矩阵不含非零元。因此,这一算法必须利用稠密矩阵的形式存储邻接矩阵,而不能根据电网图结构采用稀疏存储方式,空间复杂度高,数据规模较大时,实验所使用的GPU已经无法满足存储需求。本文提出的并行的向量求和法则与并行的深度优先搜索法均具有相对较低的GPU缓存占用。即使在数据规模较大时,如bench2,本文算法的GPU缓存占用也仅有508MB。由此可见,本文算法的内存占用低,普通PC机的CPU和GPU即可满足存储需求。

表2 本文算法与各类传统算法的内存占用对比

Tab. 2 Comparison of memory footprint of algorithm in this paper and other traditional algorithms MB

算例	向量求和法(并行)		向量求和法(串行)		邻接矩阵自乘法(并行)		深度优先搜索法(并行)	
	RAM	GPU	RAM	GPU	RAM	GPU	RAM	GPU
case118	67.1	110	67.1	0	67.1	135	70.7	113
case300	68.7	113	68.7	0	68.7	256	72.1	113
Coal 2005 NI TP	68.3	112	68.3	0	68.8	690	71.2	115
Bench	69.3	112	69.3	0	*	*	73.1	137
bench2	71.8	508	71.8	0	*	*	**	**

注: *表示由于并行的邻接矩阵自乘法空间复杂度较高,当算例规模较大时,实验所使用的GPU无法满足存储需求; **表示由于深度优先搜索法的计算效率较低,当算例规模较大时,不能在有效时间内(120s)计算出结果。

4.3 考虑动态拓扑变化下连通性检验的 N-1 安全校验整体算法效果测试

为了进一步体现本文提出的连通性检验方法的实用性,将本文算法应用于关键支路 N-1 安全校验,考虑 N-1 引起的动态拓扑变化,测试整体计算用时和GPU缓存占用峰值,具体结果如表3所示。N-1 安全校核的故障集选取所有变压器支路,某些变压器切除后考虑备自投的操作。潮流计算方法采用文献[27]中GPU并行加速的牛顿-拉夫逊法,设定最大迭代次数10次,精度 1×10^{-3} 。

由表3可以看出,利用本文算法可以有效实现 N-1 安全校验中的连通性检验, N-1 安全校验的整体效果良好,耗时少, GPU 缓存占用低。进一步地,通过对比表3和表1可以看出,系统规模较大时,连通性检验的计算耗时在 N-1 安全校验的整体计算

表3 利用本文算法的 N-1 安全校验的整体效果测试

Tab. 3 Overall effect test of N-1 security check using the algorithm in this paper

算例	关键支路数 (检验次数)	计算 用时/ms	GPU 缓存占 用峰值/MB
case118	9	219	167
case300	52	369	172
Coal 2005 NI TP	239	1073	174
bench	299	3697	172
bench2	2218	348358	508

过程中是占有一定比例的,故不可以忽略。本文算法相比其他传统的连通性检验算法加速效果显著。

5 结论

本文提出了一种基于GPU加速的 N-1 校验中电网连通性检验方法,所提方法具有以下特点:

1) 算法基于向量求和思想, 能正确有效对电网模型进行抽象、判别连通性。同时, 该算法的连通性检验过程可以根据实际情况, 充分考虑模拟线路开断时引起的动态拓扑变化, 额外得到子网划分的结果, 为后续的潮流计算、风险评估及相关辅助决策提供帮助。

2) 本文算法相较于传统的连通性检验方法如深度优先搜索法、邻接矩阵自乘法等效率显著提高, 特别是利用 GPU 加速后较串行算法计算用时进一步减小, 能很好地适用于大规模系统 $N-1$ 校验。

3) 算法 RAM 存储占用和 GPU 缓存占用小, 普通 PC 机配备的 CPU 和 GPU 即可支持。

算例测试表明, 本文所提方法能够显著提高系统 $N-1$ 安全校验中电网连通性检验的速度, 进而有助于 $N-1$ 安全校验整体计算效率的提升, 以满足电网实时 $N-1$ 潮流计算的需求, 具有工程应用的价值。在未来的研究过程中, 本文所提的连通性检验方法可以尝试应用到电力系统的其他领域中, 如电网规划等等。

参考文献

- [1] Cormen T T, Leiserson C E, Rivest R L. Introduction to algorithms[M]. Cambridge, Mass: MIT Press, 1980.
- [2] Yehsukul P D, Dabbaghchi I. A topology-based algorithm for tracking network connectivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 339-346.
- [3] 陈星莺, 孙恕坚, 钱锋. 一种基于追踪技术的快速电力网拓扑分析方法[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-24, 34.
Chen Xingying, Sun Shujian, Qian Feng. A fast power system network topology based on tracking technology [J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 22-24, 34(in Chinese).
- [4] Harish P, Narayanan P J. Accelerating large graph algorithms on the GPU using CUDA[C]//Proceedings of the 14th International Conference on High Performance Computing. Goa, India: Springer, 2007: 197-208.
- [5] 施泉生, 陆亚南. 基于图论的配电网孤岛连通性判别[J]. 中国电力, 2016, 49(6): 141-145.
Shi Quansheng, Lu Yanan. Research on the connectivity of distribution network island based on graph theory [J]. Electric Power, 2016, 49(6): 141-145(in Chinese).
- [6] 宋少群, 朱永利, 于红. 基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 45-49.
Song Shaoqun, Zhu Yongli, Yu Hong. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 45-49(in Chinese).
- [7] 刘开, 王毕元, 罗晓辉. 电网规划中网络连通性判别新方法[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 421-424.
Liu Kai, Wang Biyuan, Luo Xiaohui. A new judging method for the network connectivity in the net plan [J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 421-424(in Chinese).
- [8] 贾进章, 刘剑, 宋寿森. 基于邻接矩阵图的连通性判定准则[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(2): 158-160.
Jia Jinzhang, Liu Jian, Song Shousen. Judgement criterion of graph connectivity based on adjacent matrix[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(2): 158-160(in Chinese).
- [9] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术, 2001, 35(2): 10-13.
Wang Xiangzhong, Li Xiaolan. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. Power System Technology, 2001, 35(2): 10-13(in Chinese).
- [10] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
Ma Xiufan, Ding Ning, Li Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293(in Chinese).
- [11] 于雨, 陈云山, 王大为. 电网连通性检测方法的探讨[J]. 电力学报, 1999, 14(3): 183-188.
Yu Yu, Chen Yunshan, Wang Dawei. The study of the testing method of electric network connection[J]. Journal of Electric Power, 1999, 14(3): 183-188(in Chinese).
- [12] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 35-39.
Mei Nian, Shi Dongyuan, Duan Xianzhong. A novel method for fast power network topology formation and partial revision based on graph theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 35-39(in Chinese).
- [13] 黄家栋, 罗伟强, 赵永强, 等. 两种新的电网连通性分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 16-18, 50.
Huang Jiadong, Luo Weiqiang, Zhao Yongqiang, et al. Two new high-speed algorithms for electrical network connectivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 16-18, 50(in Chinese).
- [14] 王海峰, 陈庆奎. 图形处理器通用计算关键技术研究综述[J]. 计算机学报, 2013, 36(4): 757-772.
Wang Haifeng, Chen Qingkui. General purpose computing of graphics processing unit: A survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(4): 757-772(in Chinese).
- [15] 丁鹏, 陈利学, 龚捷, 等. GPU 通用计算研究[J]. 计

- 算机与现代化, 2010(1): 12-15.
- Ding Peng, Chen Lixue, Gong Jie, et al. Research on general purpose computation on graphic process unit [J]. Computer and Modernization, 2010(1): 12-15(in Chinese).
- [16] 郭春辉. 基于 GPU 的电力系统并行计算的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- Guo Chunhui. Research on parallel computing of electric power system based on GPU[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013(in Chinese).
- [17] 唐坤杰, 董树锋, 宋永华. 基于不完全 LU 分解预处理迭代法的电力系统潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 55-62.
- Tang Kunjie, Dong Shufeng, Song Yonghua. Power flow algorithm based on an iterative method with incomplete LU decomposition preconditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 55-62(in Chinese).
- [18] Khaitan S K. A survey of high-performance computing approaches in power systems[C]//Proceeding of 2016 Power and Energy Society General Meeting. Boston, MA, USA: IEEE, 2016.
- [19] 王一同. GPU 加速技术在图论算法中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- Wang Yitong. Application of GPU acceleration technology in graph algorithms[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014(in Chinese).
- [20] Soman J, Kishore K, Narayanan P J. A fast GPU algorithm for graph connectivity[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Workshops and Phd Forum. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [21] Jain C, Flick P, Pan T, et al. An adaptive parallel algorithm for computing connected components[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 28(9): 2428-2439.
- [22] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- Yin Jianhong, Wu Kaiya. Graph theory and its algorithms [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2003(in Chinese).
- [23] Li Fangxing, Bo Rui. Small test systems for power system economic studies[C]//Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Providence, RI, USA: IEEE, 2010.
- [24] NVIDIA. NVIDIA CUDA compute unified device architecture-programming guide[S]. Version 1.1, 2007.
- [25] 库克. CUDA 并行程序设计: GPU 编程指南[M]. 苏统华, 李东, 李松泽, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- Cook S. CUDA programming: a developer's guide to parallel computing with GPUs[M]. Su Tonghua, Li Dong, Li Songze, et al, trans. Beijing: China Machine Press, 2014(in Chinese).
- [26] 丁平, 李亚楼, 徐得超, 等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 77-82.
- Ding Ping, Li Yalou, Xu Dechao, et al. Improved algorithm of fast static state security analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 77-82(in Chinese).
- [27] 唐坤杰, 董树锋, 宋永华. 一种 GPU-CPU 异构运算框架加速的实时 N-1 交流潮流计算方法[J]. 电机工程学报[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4329-4338.
- Tang Kunjie, Dong Shufeng, Song Yonghua. A real-time N-1 AC power flow calculation method based on GPU-CPU heterogeneous computing framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4329-4338(in Chinese).



唐坤杰

收稿日期: 2017-10-21.

作者简介:

唐坤杰(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统高性能计算方法, tangkunjie1994@163.com;

*通信作者: 董树锋(1982), 男, 博士, 副教授, 研究方向为状态估计和有源配电网分析等, dongshufeng@zju.edu.cn;

宋永华(1964), 男, 博士, 教授, 研究方向为电网运行与控制 and 电力市场;

朱炳铨(1967), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度运行管理, hzzbq@sina.com.

(责任编辑 李泽荣)