

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.011

## 基于三角形算法的电力系统连通可靠性分析\*

贺金川<sup>1,2</sup>, 刘晓航<sup>1,3</sup>, 郑山锁<sup>1,3</sup>, 汪靖<sup>1,3</sup>, 陈点新<sup>1,3</sup>

(1. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学设计研究院, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055;)

**摘要:** 为了研究电力系统的连通可靠性, 介绍了网络连通性分析中常用的三种算法(图论法、模糊数学法、Warshall算法)及各自存在的问题。针对现有算法在求解传递闭包过程中未考虑对角线元素的问题, 提出了基于Warshall算法的假定算法。对此算法进行探讨后提出了可以避免偏差和考虑对角线元素处理的三角形算法, 并进行推理及证明。基于川北地区110 kV发电站与变电站的可靠性, 进行了电力系统连通可靠性的实例分析, 对比验证了三角形算法的高效性。为大型网络系统连通可靠性分析提供了理论依据。

**关键词:** 电力系统; 传递闭包; 连通性; 可靠度; Warshall算法

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0764-07

## Connectivity Reliability Analysis of Power System Based on Triangle Algorithm

HE Jinchuan<sup>1,2</sup>, LIU Xiaohang<sup>1,3</sup>, ZHENG Shansuo<sup>1,3</sup>, WANG Jing<sup>1,3</sup>, CHEN Dianxin<sup>1,3</sup>

(1. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education(XAUAT), Xi'an 710055, China; 2. Architectural Design and Research Institute of Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the connectivity reliability of power systems, three algorithms commonly used in network connectivity analysis (graph theory, fuzzy mathematics, Warshall algorithm) and their respective problems are introduced. Aiming at the existing problem that the Warshall algorithm do not consider the diagonal elements in the process of solving the transitive closure, a hypothesis algorithm is proposed based on the Warshall algorithm. After discussing the algorithm, a triangle algorithm is proposed and deduced, which avoids the deviation and considers the diagonal element processing. Based on the reliability of the 110 kV power station and substation in northern Sichuan, the reliability analysis of power system connectivity is carried out, and the efficiency of the triangle algorithm is verified. It provides a theoretical basis for reliability analysis of large-scale network systems.

**Keywords:** power system; transitive closure; connectivity; reliability; warshall algorithm

\* 收稿日期:2019-07-04;修回日期:2019-09-01

**基金项目:** 国家重点研发计划课题(2019YFC1509302)、国家自然科学基金项目(51678475)、西安市科技计划项目(2019113813CXSF016SF026)、陕西省教育厅产业化项目(18JC020)资助

**作者简介:** 贺金川(1962-),女,高级工程师。主要从事给排水设计与工程抗震。Email:1138088650@qq.com

**通讯作者:** 刘晓航(1995-),男,博士研究生。研究方向为结构工程和工程抗震。Email:296921659@qq.com

# 引言

电力系统是由供电构筑物结构(发电站、变电站等)和线路(输电铁塔、输电线路)组成的一个复杂的开放性系统,是保障人民安居乐业、生产发展必不可少的“生命线工程”,一旦电力系统遭到破坏造成功能失效,使正常的生产生活需求得不到满足,将带来巨大的经济损失并引发社会问题<sup>[1-2]</sup>。电力系统的抗震可靠性研究可分为两个部分:网络连通可靠性分析,以及系统功能可靠性分析。电力系统连通可靠性分析从节点的抗震性能试验研究出发<sup>[3-4]</sup>,通过其易损性分析输电源点到指定汇点之间有无连通路径,并考察在不同震级地震作用下两点之间的连通概率,是国内外研究学者十分关注的一个问题。常用于连通性分析的方法有:最小路与最小割法、概率论法、神经网络法、递推分解算法及 Monte-carlo 法等<sup>[5]</sup>。本文采用 Monte-carlo 法进行电力系统连通性分析,其分析的核心在于如何高效率地求解得到传递闭包。

目前常见的求解传递闭包的方法有3种:(1)图论法,将化简后的网络拓扑图作为研究对象来得到网络的连通性矩阵,拓扑图的节点为发电站和变电站,拓扑图的链路为输电线;(2)模糊数学法,建立模糊数学模型求解系统的模糊矩阵;(3)Warshall算法,利用 Warshall 算法对网络拓扑图的邻接矩阵进行布尔运算从而化简邻接矩阵。

但是上述三种方法存在各自的问题:(1)图论法在运算过程中需要做大量的阶乘运算导致计算速度较慢,随节点数的增加运算速度显著降低,不适用于大型网络分析;(2)模糊数学法在建立模糊数学模型时要将点权变为弧权,增加了矩阵的阶数,浪费了存储空间,计算效率不高;(3)现有的 Warshall 算法在连通性分析中的应用未考虑到邻接矩阵对角线节点的化简。针对以上问题,本文在应用 Monte-Carlo 法计算电力系统连通性的基础上,提出了三角形算法求解网络拓扑图的连通性矩阵,化简了邻接矩阵对角线节点不失效的问题,提升了代码运算效率适用于电力系统连通性分析。

## 1 基本假定

电力系统连通可靠性分析的前提是建立系统

网络拓扑图,其建立遵循以下基本假定:

(1)节点间的传输是单向的,电力网络拓扑图是有向图。

(2)节点的输电功能分为“失效状态”和“可靠状态”。

(3)不同节点输电功能的“失效”是互不影响的。

(4)建立的拓扑图为点权拓扑图。

## 2 现有方法简介

### 2.1 基于图论法的连通性分析方法

对于一个有向图  $D$ ,若从点  $v_i$  到点  $v_j$  存在通路,则称作点  $v_i$  可达点  $v_j$ 。该有向图  $D = \langle V, E \rangle$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 。点  $v_i$  到点  $v_j$  若存在任意通路,则令  $a_{ij} = 1$ ;若存在任何通路,取  $a_{ij} = 0$ 。称  $(a_{ij})_{n \times n}$  为  $D$  的关系矩阵<sup>[6]</sup>,简记为  $A$ 。

$$A = [a_{ij}] \quad (1)$$

式中,  $a_{ij}$  为关系矩阵  $A$  的元素。

对于(1)式,若  $A^k (k = 1, 2, \dots, n - 1) = 1$ ,表示点  $v_i$  与点  $v_j$  存在通路长度等于  $k$  的路。在电力系统连通性分析中,称  $M$  为拓扑图的可达性矩阵,点  $v_i$  与点  $v_j$  为拓扑图中的各个节点:

$$M = I \vee A \vee A^2 \vee \dots \vee A^{n-1} \quad (2)$$

式中,  $M$  为可达性矩阵,  $I$  为关系矩阵的原矩阵。

读取矩阵  $M$  中的元素  $m_{ij}$ ,结果如(3)式,便可求得不同节点间的连通情况:

$$\begin{cases} m_{ij} = 1 & \text{两节点间相通} \\ m_{ij} = 0 & \text{两节点间不连通} \end{cases} \quad (3)$$

综上,使用图论法求解节点间的连通性的过程中,可以得到两点间的最短路径。但对于系统连通性分析来说,更注重两节点间是否连通,图论法需要对邻接矩阵做大量运算,计算效率低不适用于系统连通性分析。

### 2.2 基于模糊数学法的连通性分析方法

对于一个给定的模糊有向图  $D$ ,节点集为  $V = \{1, 2, \dots, n\}$ ,其存在相对应的  $n$  阶的模糊矩阵  $R = (r_{ij})$ 。当  $r_{ij} \neq 0$  时,则节点  $i$  到节点  $j$  存在一条有向边。对有向边  $(V_i, V_j)$  赋数  $r_{ij}$ ,得到模糊有向图  $D(A)$ 。对模糊有向图的模糊矩阵  $A$  进行  $K$  次合成运算后得到模糊矩阵  $A$  的传递闭包  $\hat{R}$ 。对  $\hat{R}$  中的元

素进行判断,若 $\hat{r}_{ij}=1$ ,则本次模拟中的节点*i*与节点*j*是连通的;若 $\hat{r}_{ij}\neq 1$ ,则本次模拟中的节点*i*与节点*j*不连通<sup>[7]</sup>。

基于模糊数学的模糊关系传递闭包计算,用模糊矩阵的传递闭包代替了图论法中的可达性矩阵*M*,减少了模拟次数,算法简洁,但需要修改节点<sup>[8]</sup>。经典理论在执行网络可靠性分析时总是判定节点不失效<sup>[9]</sup>,但在电力系统中研究的就是部分节点失效后网络拓扑图的连通性问题,故无法直接带入。此时对可能发生失效的节点进行变换处理,将每个可能失效的节点*i*变换为*i'*与*i''*,两点间通过有向链路相接。进入*i*节点的链路与*i'*相连,流出*i*节点的链路与*i''*相连。用*i'*与*i''*两节点间的可靠度作为最终的可靠度。通过节点的变换可以解决节点失效的问题,但同时也会增加节点的数量从而增加了计算量,尤其是网络拓扑图存在上百失效节点时,经过节点处理后的邻接矩阵阶数太大,难以储存和运算。

### 2.3 基于Warshall算法的连通性分析方法

Warshall在1962年提出了一个可以高效求得传递闭包的算法,称为Warshall算法。对于*n*阶有向图*D*,按照图论法介绍过的流程得到相应的关系矩阵*A*。Warshall算法的核心是对传递闭包*t(R)*进行运算,其具体过程如下:

- (1)设新的矩阵*M*:=*A*;
- (2)设*j*: = 1;
- (3)对任意的*i*,如果出现*M*(*i*,*j*)=1,则对*k*=1,2,⋯,*n*,设*M*(*i*,*k*)=*M*(*i*,*k*)∨*M*(*j*,*k*);
- (4)*j*=*j*+1;
- (5)如果*j*≤*n*,转到步骤(3),否则停止。

综上,Warshall算法在运行的时候对每列每行进行判别计算,该算法的时间复杂度为 $o(n^3)$ ,相对于前两种算法,其计算速度有提升<sup>[10]</sup>,但未考虑对角线元素的处理。本文基于Warshall算法,从另一个角度提出了一种可以省略对角线元素运算的三角形算法。

## 3 三角形算法的推理与证明

### 3.1 基于Warshall算法的假定算法及探讨

现基于Warshall提出一种假定算法如下:

- (1)设新的矩阵*M*:=*A*;

(2)设*i*: = 1;

(3)对于任意的*j*行,如果出现*M*(*i*,*j*)=1,则对*k*=1,2,⋯,*n*,设*M*(*i*,*k*)=*M*(*i*,*k*)∨*M*(*k*,*j*);

(4)*i*=*i*+1;

(5)如果*i*≤*n*,转到步骤(3),否则停止。

经验证,与Warshall算法判断完第*j*列的每一行元素后再判断*j*+1列的情况不同,此假定算法对第*i*行的每一列进行判断时可能出现两种不同的情况:

(1)对第*i*行按顺序只判别一次*M*(*i*,*j*)=1的元素并将相应的*j*行加入*i*行,所得结果有时是不正确的,因为*i*行新加的元素可能没有被判别,例如:

设存在矩阵*D*={1,2,3,4},且矩阵*D*上对应的关系矩阵*A*={⟨1,3⟩,⟨2,4⟩,⟨3,2⟩},则*A*相对应的传递闭包*t(R)*={⟨1,2⟩⟨1,3⟩⟨1,4⟩⟨2,4⟩⟨3,2⟩⟨3,4⟩},此时:

$$M:=A=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*i*=1时,可知*M*[1,3]=1,因此,将第3行对应元素加到第1行中。按照上述第1种情况,逻辑判断已经到了第3列,变换得到的*M*[1,2]=1不被考虑了,此时:

$$M:=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*i*=2时,可知*M*[2,4]=1,将第4行对应元素加到第2行中,结果不变。

*i*=3时,可知*M*[3,2]=1,将第2行对应元素加到第3行中,得:

$$M:=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*i*=4时,第4行全为0,因此最终连通性矩阵*M<sub>R</sub>*为:

$$M_R:=t(R)=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

显然*M*[1,4]=0,即⟨1,4⟩∉*t(R)*,而从所给条件可以看出⟨1,4⟩∈*t(R)*,显然所求得的可达性

矩阵  $M$  有误。

(2) 在第  $i$  行每添加元素后重新判别第  $i$  行  $M[i, j] = 1$  的元素, 则需要很多存储空间来区分已处理与新增  $M[i, j] = 1$  的元素, 算法的复杂性也会大大提高。

### 3.2 三角形算法的理论及证明

当  $i = j$  时, 同行元素逻辑相加结果不变, 且拓扑图同一节点不存在连通性, 因此, 对角线上的元素不需处理。现基于先前的假定算法提出三角形算法, 可以避免 3.1 节中情况(1)的发生, 省去了邻接矩阵上对角线元素的运算, 并且可以减少储存空间及运算时间。用现有的十字链表法来存储有向图, 可以达到高效的存取效果, 同时代码的可读性也会得到提升。三角形算法如下所示:

```

Procedure Delta
  (Var  $M$ : array[1...n, 1...n of Boolean;
  A: array[1...n, 1...n of Boolean]
  Var  $i, j, k$ : integer;
begin
  for  $j := 1$  to  $n$  do
  for  $j := 1$  to  $n$  do {传送  $A$  至  $M$ }
   $M[i, j] := A[i, j]$ 
  for  $i := 2$  to  $n$  do {处理下三角}
  for  $j := 1$  to  $i - 1$  do
  if  $M[i, j] = 1$  then
  for  $k := 1$  to  $n$  do
   $M[i, k] := M[i, k] \vee M[j, k]$ 
  for  $i := n - 1$  to  $1$  do {处理上三角}
  for  $j := n$  to  $i + 1$  do
  if  $M[i, j] = 1$  then
  for  $k := 1$  to  $n$  do
   $M[i, k] := M[i, k] \vee M[j, k]$ 
end; {Delta}
  
```

下面再对 3.1 节的举例进行运算。设存在矩阵  $D = \{1, 2, 3, 4\}$ , 且矩阵  $D$  上对应的的关系矩阵  $A = \{\langle 1, 3 \rangle, \langle 2, 4 \rangle, \langle 3, 2 \rangle\}$ , 则  $A$  相对应的传递闭包  $t(R) = \{\langle 1, 2 \rangle, \langle 1, 3 \rangle, \langle 1, 4 \rangle, \langle 2, 4 \rangle, \langle 3, 2 \rangle, \langle 3, 4 \rangle\}$ , 此时:

$$M := A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

下三角中  $M[3, 2] = 1$ , 将第 2 行对应元素加到第 3 行, 得:

$$M := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

上三角中, 先处理  $A[1, 3] = 1$ , 将第 3 行对应元素加到第 1 行, 得:

$$M := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

再处理  $M[2, 4]$  和  $M[3, 4]$ , 相应元素为 0, 因此最终的连通性矩阵  $M_R$  为:

$$M_R := t(R) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

此时得到的连通性矩阵  $M_R$  与所给传递闭包  $t(R)$  完全对应一致, 通过上述举例说明三角形算法是正确的, 并且从理论的角度证明如下:

下三角中的  $M(i, j) = 1$  具有  $i > j$  的特性, 在将第  $j$  行加到第  $i$  行后若出现  $k < j$  的  $A(i, k) = 1$ , 下面证明不需再处理  $A(i, k) = 1$  了, 即不再将第  $k$  行加到第  $i$  行了。换言之, 要证明, 若  $A(i, k) = 1$  且  $A(k, r) = 1$ , 则必有  $A(i, r) = 1$ , 而此  $A(i, r) = 1$  不是通过第  $k$  行加到第  $i$  行而得到的,  $1 \leq r \leq n$ 。若  $A(j, k) = 1$ , 则处理  $A(i, j) = 1$  时, 有  $A(i, k) = 1$ 。在处理  $A(i, k) = 1$  时, 已经将第  $k$  行加到第  $j$  行了 (因  $i > j$ , 故比  $A[i, j]$  先运算)。由于假设  $A(k, r) = 1$ , 因此有  $A(j, r) = 1$ , 从而在处理  $A(i, j) = 1$  而将第  $j$  行加到第  $i$  行时, 有  $A(i, r) = 1$ 。此时可不再处理  $A(i, k) = 1$ 。

对于上三角的证明同理。

三角形算法适用于节点数量多的网络连通性计算, 节点数量越多, 它的优势越明显。本文将在川北地区 110 kV 发电站、变电站抗震可靠性的基础上举例计算说明。

## 4 应用三角形算法分析电力系统的连通可靠性

将电力系统网络简化为有向加权拓扑图, 以节

点的破坏概率作为网络各点权。将网络拓扑图的邻接矩阵  $A[i, j]$  及换算后各节点的抗震可靠度录入系统, 基于 Monte-carlo 法对邻接矩阵中的各元素进行修正。使用三角形算法求解修正后邻接矩阵的传递闭包, 最后得到连通性矩阵  $M$ , 为了直观的得到连通性概率, 进行重复运算并将每一次运算过后的结果记录在连通矩阵  $T$  中。经过大量重复运算后, 连通矩阵中得到的结果可近似看作连通性概率, 基本计算步骤如下:

(1) 基于变电站抗震可靠度的分析结果, 可得拓扑图节点发生失效的概率为  $P_f(i, j)$ ;

(2) 使用 Monte-calor 法, 将随机数  $R_{ij} (0 \leq R_{ij} \leq 1)$  与节点发生失效的概率  $P_f(i, j)$  相比较, 然后对拓扑图的邻接矩阵  $A$  进行修正, 其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & R_{ij} > P_f(i, j) \\ 0 & R_{ij} \leq P_f(i, j) \end{cases} \quad (4)$$

(3) 使用三角形算法得到邻接矩阵修正后的连通性矩阵  $M$ 。其中:

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & i, j \text{ 节点之间连通} \\ 0 & i, j \text{ 节点之间不连通} \end{cases} \quad (5)$$

(4) 将每次模拟后的节点连通结果记录在矩阵  $T$  中:

$$t_{ij}^{k+1} = t_{ij}^k + \begin{cases} 1 & m_{ij} = 1 \\ 0 & m_{ij} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

(5) 重复上述 (1)~(3) 步骤, 进行多次模拟后 (为了精确度, 建议 5 000 次), 得到的电网连通概率矩阵  $P$  为:

$$p_{ij} = \frac{t_{ij}}{N} \quad (7)$$

基于上述相关理论, 采用 Matlab 程序, 将电力系统的连通性分析流程予以程序实现, 其分析流程如图 1 所示。

## 5 算例分析

在不考虑输电线路失效只考虑节点失效的情况下, 以川北地区 110 kV 以上接线系统为例, 分析该电力系统网络在设定各级地震作用下的连通可靠性。其电力网络化简后的网络拓扑图如图 2 所示, 拓扑图中包含了 24 个节点和 28 条链路。其中, 节点 1、2、3 为发电站, 其余节点均为变电站, 有向链

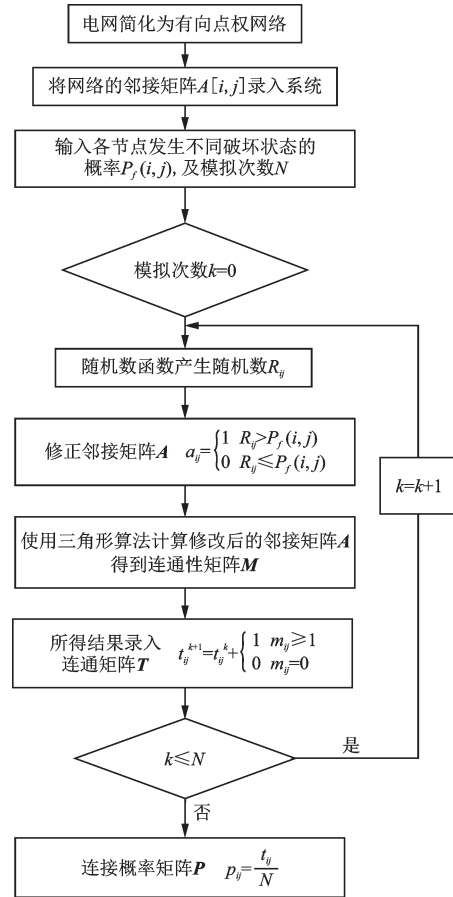


图 1 连通性分析流程

Fig.1 Flow chart of connectivity analysis

路代表输电线路及方向。

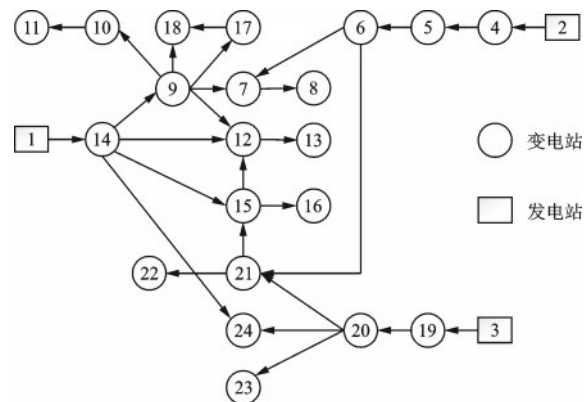


图 2 电力系统网络局部拓扑图

Fig.2 Power system local network model diagram

根据发电厂、变电站可靠性分析结果得到电力网络拓扑图节点在设定各级地震作用下的可靠度, 见表 1<sup>[11]</sup>。

以 PGA 为 0.20g 的可靠度为研究目标, 应用本文提出的三角形算法求解网络拓扑邻接矩阵的传

表1 节点抗震可靠度

Table 1 List of node Seismic Reliability

编号	设防烈度	设定地震作用下各节点可靠度			
		0.10g	0.20g	0.40g	0.80g
1	VIII	0.956 7	0.842 8	0.731 0	0.596 0
2	VII	0.965 8	0.811 8	0.725 3	0.622 5
3	VII	0.949 3	0.845 5	0.751 5	0.622 0
4	VII	0.960 7	0.823 5	0.764 1	0.624 7
5	VII	0.967 8	0.851 8	0.711 9	0.562 0
6	VII	0.931 3	0.868 3	0.696 3	0.583 6
7	VII	0.934 0	0.821 4	0.744 8	0.609 3
8	VII	0.977 8	0.844 2	0.738 6	0.568 0
9	VII	0.971 6	0.829 2	0.745 3	0.584 2
10	VII	0.948 2	0.864 0	0.703 0	0.579 7
11	VII	0.968 2	0.849 0	0.710 9	0.616 2
12	VII	0.933 1	0.866 5	0.746 9	0.572 0
13	VII	0.963 4	0.813 5	0.736 0	0.624 7
14	VII	0.942 9	0.816 7	0.732 6	0.617 0
15	VII	0.943 3	0.858 4	0.712 0	0.600 9
16	VII	0.950 6	0.839 0	0.764 2	0.611 4
17	VII	0.951 0	0.849 9	0.742 9	0.558 5
18	VII	0.964 0	0.838 2	0.761 1	0.585 8
19	VII	0.964 5	0.843 7	0.763 6	0.564 4
20	VII	0.972 9	0.847 3	0.704 8	0.609 2
21	VII	0.957 9	0.831 8	0.716 0	0.567 3
22	VII	0.978 3	0.814 0	0.734 4	0.591 7
23	VII	0.949 4	0.845 1	0.692 2	0.572 8
24	VII	0.938 8	0.833 9	0.711 5	0.615 6

递闭包,然后得到连通性矩阵。为了检验本算法的准确性,将使用图论法、模糊数学法、Warshall算法得到的结果与三角形算法的结果一同列于表2中进行比较,算法程序皆用 Matlab 运行,各模拟5 000次。

由表2可见,4种算法的节点连通可靠度分析结果相差不大,验证了三角形算法的准确性。由于 Monte-carlo 非收敛,导致可靠度计算结果有差异,但误差在允许范围之内。计算结果表明,6、10、11、17节点连通可靠度较低,故应对这几个节点的抗震薄弱部位进行加固。

由表3可见,三角形算法在计算速度上相对于其它算法有明显的提升,且对于拥有上百个节点的大

表2 不同算法连通可靠度分析结果

Table 2 List of analysis results of different algorithms connected reliability

编号	连通可靠度			
	三角形算法	图论法	模糊数学法	Warshall算法
4	0.668 6	0.668 3	0.665 3	0.669 1
5	0.562 4	0.564 2	0.563 7	0.563 2
6	0.494 6	0.494 9	0.495 2	0.495 8
7	0.689 8	0.687 6	0.689 6	0.687 4
8	0.582 6	0.581 5	0.585 6	0.582 1
9	0.570 8	0.572 5	0.571 1	0.572 7
10	0.493 1	0.488 8	0.490 8	0.489 9
11	0.416 8	0.414 3	0.412 4	0.418 5
12	0.851 6	0.853 3	0.849 1	0.848 6
13	0.694 8	0.694 5	0.694 1	0.694 2
14	0.685 4	0.685 2	0.686 5	0.684 7
15	0.840 2	0.840 7	0.841 6	0.841 1
16	0.694 8	0.692 9	0.691 9	0.695 3
17	0.481 2	0.481 9	0.473 1	0.483 7
18	0.548 2	0.547 2	0.547 1	0.547 3
19	0.691 0	0.691 2	0.692 3	0.690 7
20	0.588 0	0.587 6	0.588 1	0.588 4
21	0.712 4	0.712 0	0.713 4	0.713 3
22	0.578 8	0.576 9	0.579 6	0.576 6
23	0.512 1	0.511 9	0.512 6	0.512 2
24	0.790 8	0.792 3	0.792 5	0.789 5

表3 不同算法计算所需时间

Table 3 Times Required for calculation of different algorithms

运算次数	单位:s			
	三角形算法	Warshall算法	图论法	模糊数学法
2 000	1.54	2.05	141.00	67.95
3 000	2.34	3.12	213.72	102.96
4 000	3.17	4.14	284.24	136.93
5 000	3.89	5.17	354.77	170.91

型网络拓扑分析,三角形算法的优势将更为显著。

## 6 结 语

针对电力系统震后连通可靠性研究,在探讨

Warshall算法的变化与应用后提出了一种可以规避邻接矩阵对角线元素的三角形算法并进行证明推理。通过实例研究某区域电网震后网络连通性,证明了此算法的可行性与高效性。应用本算法可以发现网络系统中的薄弱节点,提供震前加固依据,也可以快速提供震后的连通性分析,为生命线工程的相关研究提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] 林均岐,陈永盛,刘金龙. 电力系统震后网络连通性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 181-185.  
Lin J Q, Chen Y Sh, Liu J L. Study on post-earthquake connectivity of electric power system [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31 (6): 181-185. (in Chinese)
- [2] 文波,牛荻涛,赵鹏. 电力系统抗震可靠性研究与分析综述[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 86-90, 108.  
Wen B, Niu D T, Zhao P. Summary of research and analysis on seismic reliability of power system [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22 (4): 86-90, 108. (in Chinese)
- [3] Zeng L, Xiao Y F, Chen Y G, et al. Seismic damage evaluation of concrete-encased steel frame-reinforced concrete core tube buildings based on dynamic characteristics [J]. Applied Sciences, 2017, 7(4): 317.
- [4] Zeng L, Ren W, Zou Z, et al. Experimental study on seismic behavior of frame structures composed of concrete encased columns with L-shaped steel section and steel beams [J]. Earthquakes and Structures, 2019, 16 (1): 97-107.
- [5] 钱保国,叶志明,陈玲俐,等. 生命线工程网络系统抗震可靠性分析方法综述[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 122-126.  
Qian B G, Ye Zh M, Chen L L, et al. Summary of analysis method for seismic reliability of lifeline network system [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(1): 122-126. (in Chinese)
- [6] 左孝凌,李为鉴,刘永才. 离散数学[M], 上海: 上海科学技术文献出版社, 1982: 58-64.  
Zuo X L, Li W J, Liu Y C. Discrete mathematics [M], Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1982: 58-64. (in Chinese)
- [7] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 第三版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006: 84-93.  
Xie J J, Liu Ch P. Fuzzy mathematics method and application [M]. 3rd Edition. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2006: 83-94. (In Chinese)
- [8] 叶帅宏. 模糊随机结构及机构可靠性及工程上的应用 [D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 14-19.  
Ye Sh H. Fuzzy and random reliability analysis on the structure and mechanism and its application in engineering [D]. Shanghai: East China University of Science Technology. 2013: 14-19. (in Chinese)
- [9] Isoyama R. Practical performance evaluation of water supply networks during seismic disaster [J]. Science and Technology, 1981(2): 111-125.
- [10] 柳春光,王茜. 基于Warshall算法的供电系统抗震可靠性分析[J]. 世界地震工程, 2013, 29(2): 10-16.  
Liu Ch G, Wang Q. Seismic reliability analysis of power-supply system based on Warshall algorithm [J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29 (2): 10-16. (in Chinese)
- [11] 陈永盛. 电力系统震后连通性与可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010: 50-62.  
Chen Y Sh. Study on Post-earthquake Connectivity and Reliability of Electric Power Systems [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2010: 50-62. (in Chinese)
- [12] 侯雨伸,王秀丽,刘杰,等. 基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 744-750.  
Hou Y Sh, Wang X L, Liu J, et al. A quasi-monte carlo method based power system reliability evaluation [D]. Power System Technology, 2015, 39 (3): 744-750. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)