

# 基于最优独立通路的通风网络调节位置优化

钟德云<sup>1,2</sup>, 刘雨龙<sup>1</sup>, 王李管<sup>1,2</sup>, 毕 林<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南 长沙 410221)

**摘要:** 独立通路在通风网络中具有重要的作用, 寻找一种能够快速搜索复杂网络独立通路的算法具有重要意义。采用通路法进行网络调节可以优化通风网络的调节效果。传统的通路搜索算法搜索的通路一般较长, 无法处理特殊网络的搜索问题且无法同时保证通路的独立性和完备性。为了解决传统通路搜索算法存在的问题, 系统研究了独立通路搜索的关键技术, 在分析传统通路搜索算法局限性的基础上, 提出了 1 种改进的独立通路搜索算法。该算法处理了网络中的割边、割点问题, 避免了算法陷入死循环或异常中断; 结合 BFS 法改进了通路搜索的性能, 便于控制通路中关键分支的搜索; 分析独立通路完备性搜索失败的原因, 并通过记忆搜索策略解决了含有单向回路的通路搜索问题。利用改进的独立通路搜索算法, 提出了 1 种自适应通路调节法, 该方法可以获得 1 棵具有最优调节位置的最佳通路调节树, 从而得到一组最优增阻调节解。

**关键词:** 独立通路; 网络调节; 单向回路; 割边; 割点; BFS; 记忆搜索策略

**中图分类号:** TD72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)03-0086-07

**DOI:** 10.13426/j.cnki.yky.2024.01.06

在通风网络理论中, 利用最大阻力路线进行通路法调节是重要的应用之一。对于给定的起点和终点寻找 1 条通路, 已有许多成熟的算法, 尤其是寻找两点之间的最短路径的算法包括 Dijkstra 算法、SPF 算法、Floyd-Warshall 算法和 Bellman-Ford 算法等<sup>[1-3]</sup>。而寻找两点之间所有独立通路的算法则复杂得多, 相应的算法研究还不成熟。

目前, 关于独立通路搜索的方法可分为线性规划法、矩阵法和网络搜索法。线性规划法使用较少, 孙智帅等根据网络流线性规划模型提出了顶点独立路径线性规划模型和弧独立路径规划模型, 但还未提出独立通路的线性规划模型<sup>[4-5]</sup>。矩阵法是一般的通路搜索算法, 在有单向回路的网络中易产生包含单向回路的假通路; 对于较复杂的网络, 可能出现单向回路循环搜索多次且通路搜索失败的情况<sup>[6]</sup>。基于图论的网络搜索法<sup>[7]</sup>最常用, 其搜索效率高, 且各种约束条件在搜索过程中易于控制。

通风网络优化调节是当前通风领域研究的瓶颈, 混合型通风网络优化模型是 1 个非凸规划模

型, 由于调节位置的不确定性, 目前还没有可靠的求解方法<sup>[8-9]</sup>。本研究基于图论中的网络图遍历搜索算法改进独立通路搜索算法, 并利用改进的独立通路搜索算法提出 1 种通风网络自适应优化调节算法。

## 1 独立通路及其应用

### 1.1 独立通路相关概念

一般通路是指有向图中始末节点间的有向路径; 在复杂网络中, 含有单向回路的网络中总是存在方向不一致的路径。因此, 为了保证通路的完备性, 本研究所指的独立通路搜索是无向图的通路搜索, 具有更广泛的适用性。

为便于研究, 定义以下几个概念。通路的独立性: 所有通路两两相互独立, 通路之间线性无关。通路的完备性: 任意 1 条通路都可以由搜索的独立通路线性表示。独立通路: 单源汇网络中, 从源点到汇点之间的 1 组线性无关、满足完备性的最大通路集合。

在复杂网络中搜索独立通路, 必须同时保证

收稿日期: 2024-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2904105)。

第一作者简介: 钟德云(1990—), 男, 福建龙岩人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为矿井通风。

通路的独立性和完备性。为保证通路的独立性,通常在新通路搜索时加入1条以前通路中不存在的新分支,同时新通路必须尽量利用已有通路搜索信息;否则,确保了独立性却无法保证完备性。

在处理特殊网络的搜索问题时,传统的通路搜索算法易陷入死循环;由于深度优先搜索的盲目性,搜索的通路一般较长,无法控制关键分支的搜索;传统的通路搜索算法一般不能同时保证通路的独立性和完备性。

## 1.2 独立通路的应用

独立通路代表了1组从源点到汇点的路径集合,在自动识别角联风路、风网简化、绘制网络特征图和通风网络调节等方面有着极其重要的应用。

### 1.2.1 初始化通风网络解算风量

由于独立通路可以看作是1组特殊的独立回路(若考虑虚拟分支),因此可以将每条通路看作1个环流,初始化整个网络的风量。

### 1.2.2 最大阻力路线

由于任意1条通路可以由独立通路线性表示,因此,理论上可以找到1条最大阻力路线。

### 1.2.3 网络最大流

通风网络的最大通风能力可以应用传统的网络流法进行计算,目前较常用的网络流法有Ford-Fulkerson法、Edmons-Karp法和Dinic法,刘剑则提出了1种应用通路法求网络最大流的算法<sup>[10]</sup>。

### 1.2.4 通风网络最优断面

利用通路法求最大阻力路线,在最大阻力路线上调整断面进行降阻,再重新寻找最大阻力路线,将对最大阻力路线上的高阻力巷道逐一断面优化<sup>[11]</sup>。

### 1.2.5 通风网络调节

通路调节法是通风网络调节中的重要方法,根据独立通路确定调阻矩阵,确定每条通路的调阻值,按最大阻力路线输出所有调阻方案,既可以降低通风网络的调节功耗,又为确定通风网络调节方案提供了一定的选择范围<sup>[12]</sup>。

## 2 独立通路搜索算法分析

### 2.1 搜索算法设计

在图论网络图遍历搜索算法中,最经典的算法有深度优先搜索法(DFS)和广度优先搜索法

(BFS),分支遍历时分别按深度和广度优先搜索子节点关联分支直至遍历整个网络,最终可以分别得到1棵深度优先搜索生成树和1棵广度优先搜索生成树。

在独立通路网络搜索算法中,最常用的是基于深度优先的通路搜索算法。为了模拟算法的动态搜索过程,设计以具有“后进先出”特点的栈结构来保存当前通路搜索路径,整个搜索过程由一系列进栈、出栈和退栈等操作过程来完成。

分支属性数据结构设计如下:

```
Struct PathEdge
{
  Int m_ID;           //编号(唯一)
  CString m_Name;    //分支名称
  Int m_parentID;    //父节点编号
  Int m_iVisit;      //分支访问状态
}
```

节点属性数据结构设计如下:

```
Struct PathNode
{
  Int m_ID;           //编号(唯一)
  CString m_Name;    //节点名称
  Int m_parentID;    //入支编号
  Int m_iVisit;      //节点访问状态
  bool m_bVisit;     //是否已有通路搜索信息
  bool m_bStack;     //表示是否入栈成功
}
```

定义1:当前搜索节点。深度优先搜索遍历的当前节点,即栈顶元素。

定义2:当前搜索分支。当前搜索通路中未出现在以前搜索通路上的新分支。

定义3:节点访问状态。为了对搜索节点进行标记设置的状态,分为未访问、待访问和已访问3种状态。所有节点初始化时为未访问状态。栈中节点除栈顶元素外均为已访问状态。

定义4:分支访问状态。为了对搜索分支进行标记设置的状态,分为未访问状态和已访问状态。所有分支初始化时为未访问状态。当前搜索路径上的分支均为已访问状态。

利用栈结构进行深度优先搜索时,栈中的节点构成1条路径,在当前搜索节点遍历到栈中节点(节点为已访问状态)时,即找到1条通路。为了防止重复遍历已经搜索的分支,对于栈中的节

点应记录已经搜索的关联分支。

## 2.2 特殊网络分析

### 2.2.1 割边割点分析

如果从图中删去某点和与该点相关联的边后,图不再连通,那么这个点叫作割点;如果从图中删去某条边后,图不再连通,那么这条边叫作割边。传统的算法存在通路搜索不完备、通路中有单向回路、通路中存在不好处理的割边、割点等复杂网络搜索问题。改进的通路搜索算法按无向图进行网络遍历,可有效解决含有单向回路的独立通路搜索问题。在分支遍历时,按子节点关联有向分支优先遍历可以保证搜索的通路倾向于有向通路。

在特殊的网络中,当通路搜索的起点或终点位于割点或割边的端点时,通路搜索就可能出现异常中断或陷入死循环;即使在强连通网络中,只要存在割点,通路搜索也可能失败。例如,当通路搜索的始末节点在某一割边或割点的某一侧集中时,通路搜索失败。为了避免通路搜索失败,需要对网络

图进行连通性检查,并搜索和处理存在的割边和割点,使算法能适用于任意复杂的网络中。

### 2.2.2 割边割点算法求解

由于割边可看作无向图中不在任何回路中的边,因此可以用回路法搜索所有不在回路中的边,但该算法需要搜索回路<sup>[13]</sup>。割点也可以根据其定义方式来搜索,直接判断各节点移除后是否为非连通图即可。割边和割点可以采用 Tarjan 算法快速求解(图 1),按 Tarjan 算法特殊网络处理过程如下<sup>[14]</sup>:1)按 DFS 法遍历网络图,记录遍历节点  $i$  在 DFS 树中的深度  $dep[i]$  以及其子孙节点所能达到的最浅深度  $low[i]$ ;2)对于得到的 DFS 树,判断每个节点的搜索信息;3)若根结点有 1 个以上的子节点,则根结点为割点;若节点  $u$  的某个子节点  $v$ ,当  $low[v] \geq dep[u]$  时, $u$  为 1 个割点,当  $low[v] > dep[u]$  时, $(u, v)$  为 1 条割边;4)在通路搜索时将割点与割边作为过渡点与边,不允许将割点或割边的端点作为网络图的源点或汇点。

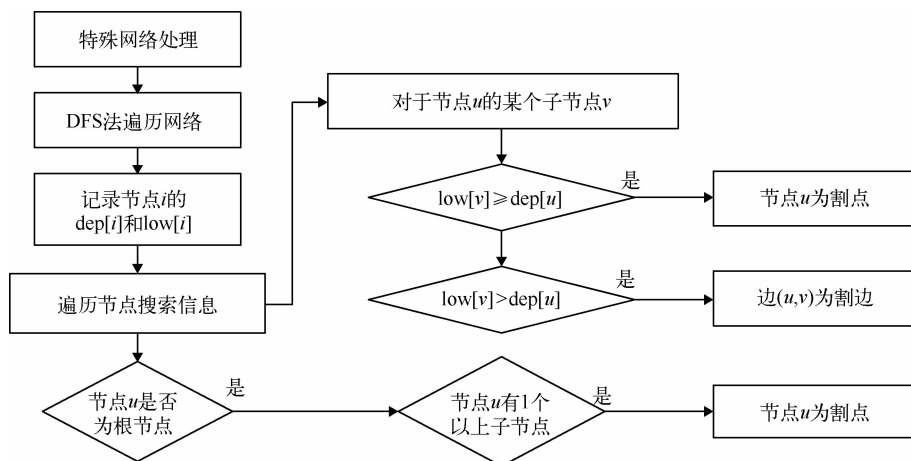


图 1 特殊网络处理流程

Fig. 1 Specific network operation flow diagram

## 3 改进的独立通路搜索算法

### 3.1 算法关键过程

独立通路搜索的结果直接影响到通路法调节的可靠性。最优独立通路的搜索既要确保各通路的独立性和完备性,又要确保较短的通路路径并避免搜索失败。在算法搜索时,改进的独立通路搜索法首先应构建好节点-分支间的拓扑关系,结合广度优先搜索利用栈结构对节点进行深度优先遍历,算法的关键过程由初始化栈、出栈操作、新分支搜

索、进栈操作、退栈操作等子过程组成。

#### 3.1.1 初始化栈

将通风网络转化为单源汇网络,以源点为通路搜索起点,以汇点为通路搜索终点,以进风分支为当前搜索分支。设置通路搜索起点为待访问节点,并将其入栈。

#### 3.1.2 出栈操作

取出当前搜索节点(即栈顶节点),如果为通路终点,则说明找到 1 条通路;否则判断节点访问状态,若为待访问状态,将其设置为已访问,然后

进行进栈操作;若节点已有通路搜索信息,则按已有通路的搜索信息仍可找到 1 条通路。然后圈划通路,记录搜索到的通路信息,并将通路中分支均设置为已圈划。若已找到  $M$  条通路,则退出搜索。否则,清空栈 NdStack,清空节点访问信息,清空分支访问信息;开始搜索下一条通路,重新初始化栈。

### 3.1.3 新分支搜索

为了保证通路的独立性,需要搜索 1 条未出现在当前已搜索通路上的新分支,将其设为当前搜索分支。所有通路搜索的新分支,最终可以构成 1 棵通路树的余树分支。按广度优先顺序搜索新分支各节点,忽略已圈划分支和虚拟分支,直至找到 1 个新分支;然后按广度优先搜索树回溯至通路搜索起点,保存该路径(包括路径信息)至 NdStack 中。考虑到通路存在始末节点的方向性,需要按试探法确定新分支与通路连接的始末节点。

### 3.1.4 进栈操作

对当前搜索节点的关联分支进行遍历,进栈处理流程见图 2。若进栈失败,则执行退栈操作;若进栈异常,则退出搜索。

首先对关联分支的访问属性进行判断,若分支已访问则不作处理;若分支未访问,而且分支子节点的通路搜索状态 bVisit 为 false,则进一步判断分支子节点的访问状态:1)若子节点为待访

问状态,则异常;2)若子节点为未访问状态,设置末节点为待访问,子节点进栈,并记录父节点信息和已经搜索的关联分支,设置分支已访问;3)若子节点为已访问状态,则不做处理。

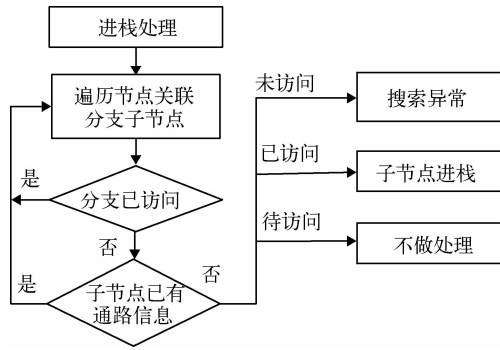


图 2 进栈处理流程

Fig. 2 Push on operation flow

### 3.1.5 退栈操作

仅在进栈失败的情况下,才进行退栈操作。根据当前搜索节点的父节点信息退回父节点;同时清除子节点的父节点信息和已搜索的关联分支信息,开始搜索父节点关联的其他分支。

## 3.2 独立通路搜索算法

### 3.2.1 独立通路搜索算法流程

基于深度优先搜索的独立通路搜索算法流程见图 3。

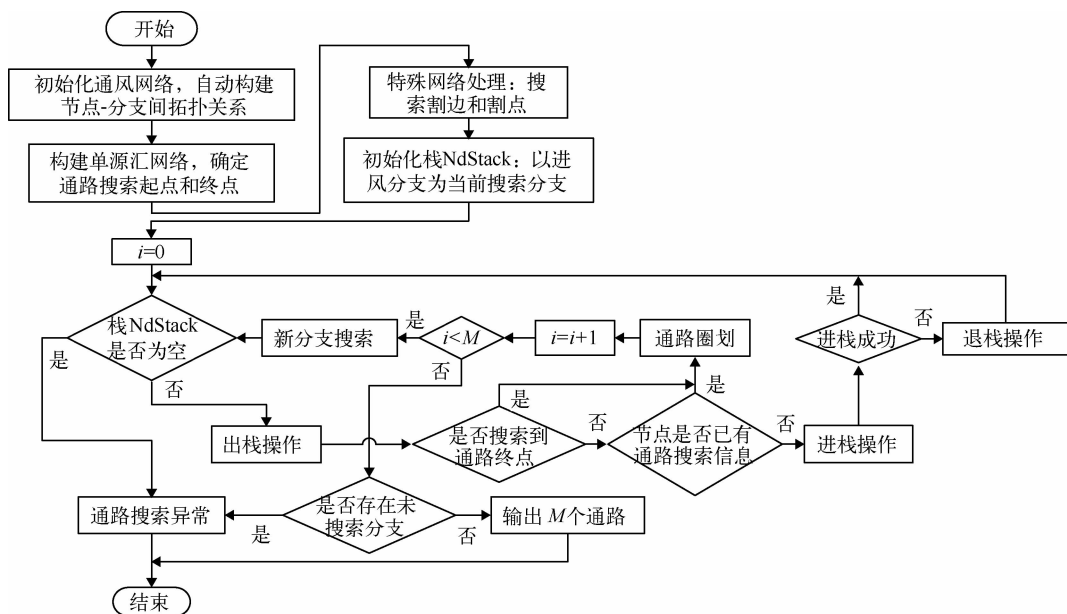


图 3 独立通路搜索算法流程

Fig. 3 Independent path algorithm flow

### 3.2.2 独立通路搜索算法描述

第 1 步:根据网络图节点-分支的位置关系自动构建网络拓扑关系,断开虚拟分支和独头封闭巷道,设置所有节点和分支为未访问状态。

第 2 步:搜索进回风分支,将多进出风井网络图转化为等效单源汇网络图,确定通路搜索起点和终点。

第 3 步:按 Tarjan 算法对含有割边和割点的特殊网络进行处理。

第 4 步:初始化栈 NdStack,以进风分支为当前搜索分支,令  $i=0$ 。

第 5 步:判断栈 NdStack 是否为空,若为空说明通路搜索异常,否则对其作出栈操作;取出栈顶节点(当前搜索节点),判断其是否为通路终点,若是则找到 1 条通路,跳转到第 8 步。

第 6 步:判断当前搜索节点是否已有通路搜索信息,若有则找到 1 条通路,跳转到第 8 步。

第 7 步:根据节点-分支间的拓扑关系,遍历节点相关联的分支,进行进栈操作;若进栈失败,则进行退栈操作,跳转到第 5 步,进栈成功则直接跳转到第 5 步。

第 8 步:根据当前通路中栈的搜索信息,圈划第  $i$  条通路;令  $i = i + 1$ 。

第 9 步:若  $i < M$ ,搜索新分支,重新初始化栈,跳转到第 5 步;若  $i \geq M$  且不存在未搜索分支,则说明通路搜索成功,输出  $M$  个通路信息,退出程序。

## 4 通风网络优化调节

按最大阻力路线进行通路法调节是以各分支风量分配和风阻值为已知条件,在平衡通风网络压力的基础上,以优化风窗设置地点为目标的方法。利用改进的独立通路搜索算法,提出了自适应通路调节法,该方法可以获得 1 棵具有最优调节位置的最佳通路调节树,从而得到 1 组最优增阻调节解。

### 4.1 优化调节方法

在获取 1 组独立通路的基础上,为确定各条通路的最佳调节位置,通风网络优化调节过程如下。

首先根据巷道是否可调节、允许风窗调节的可接受程度,设置相应的调节级数,作为优化调节位置的衡量指标。根据生产调节和巷道用途,将

不允许增阻的巷道如运输巷道设置为不可调节;根据可调节巷道对增阻调节受影响的程度设置相应的调节级数,以便在每条通路中选择最佳的调节位置。

第 1 步:初始化含有  $N$  条分支、 $J$  个节点的通风网络图  $G(N, J)$ ,利用改进的独立通路法获得 1 组独立通路  $T = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_M\}$ ,其中  $M = N - J + 1$ 。

第 2 步:计算通路阻力,并按通路阻力进行降序排列通路,形成有序的待调通路。

$$H_i = \sum_{j=1}^N h_{ij} = \sum_{j=1}^N R_j Q_j^2, i = 1, 2, \dots, L。$$

第 3 步:按搜索的独立通路形成通路调阻矩阵,以最大阻力路线为基准,计算各通路的调阻值,获得第 1 个待调通路:

$$H_{ai} = H_{\max} - H_i, i = 1, 2, \dots, M。$$

第 4 步:确定待调通路中的主动调阻分支,按调节级数选择 1 条最佳的主动调阻分支作为该通路的调节分支,计算调阻值,并相应修改该分支在其他通路中表现为被动调阻分支的调阻值。

当待调通路上的某条分支  $e_{ij}$  满足:  $e_{ij} \in P_i$ , 且该分支相应调节级数  $(e_{ij}) = \max \{P_i\}$ , 则称此分支为主动调阻分支。同时,当前待调通路上的调节分支应在前面从未调节过,因此待调通路  $P_i$  上的某条调节分支  $e_{ij}$  还应满足<sup>[15]</sup>:

$$e_{ij} \notin \{P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_{i-1}\},$$

且  $e_{ij} \in \{P_i - (P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_{i-1})\}$ ,  $i = 2, 3, \dots, k$ ;

$$\text{令 } E_i = P_i - (P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_{i-1})。$$

第 5 步:重新按通路阻力进行降序排列通路,获得下一个待调通路,返回第 4 步,直至所有通路调节完毕。

第 6 步:根据所有主动调阻分支的调节值,获得 1 组最优增阻调节解。

第 7 步:对于同级调节级数,可以按“风窗搬家”法获得 1 种次优的调节方案。

当通风网络允许降阻或增压调节时,关键路径上的主导分支取期望值是通风网络功耗为最小的充要条件。当采取增阻调节时,是以关键路径的阻力值为基准,按通路阻力降序调节其他通路。

### 4.2 算例分析

通风网络调节实例见图 4。采用改进的独立通路搜索算法寻找 1 组独立通路,对其进行优化

调节。

通路自适应调节过程,先根据巷道位置的可调性设置分支的调节级数,按 10 级划分,其中 1

级为可调,10 级为不可调。由于搜索算法采用了记忆搜索策略,可以快速获取独立通路。搜索得到的独立通路以及各分支调节级数见表 1。

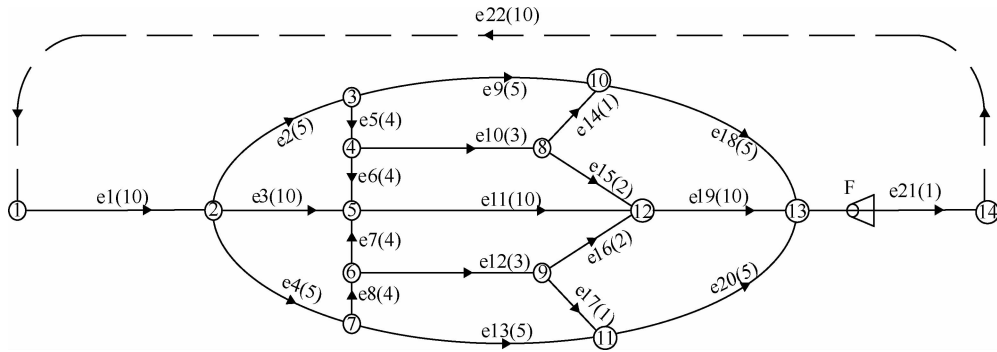


图 4 通风网络图

Fig. 4 Ventilation network diagram

调节需求:减少 e5(4)分支的风量,调节级数为 4。

调节过程:根据通路搜索结果(表 1),计算通路调节压力,按调节级数选择 1 条最佳的主动调

阻分支作为该通路的调节分支。

调节结果:对 e14(1)分支进行增阻调节,调节级数为 1。

表 1 独立通路与网络调节过程分析

Table 1 Independent path and analysis of network regulation

调节通路	调节级数	调节压力	调节方案	调节分支	调节方式
1-2-9-18-21	10-5-5-5-1	0			
1-2-5-10-14-18-21	10-5-4-3-1-5-1	$H(e_5)$	e14(1)		
1-2-5-10-15-19-21	10-5-4-3-2-10-1	$H(e_5)$	e15(2)		
1-2-5-6-11-19-21	10-5-4-4-10-10-1	$H(e_5)$	e6(4)	选取调节	
1-3-11-19-21	10-10-10-10-1	0		计算最小	增阻调节
1-4-13-20-21	10-5-5-5-1	0		的分支:e14(1)	
1-4-8-12-17-20-21	10-5-4-3-1-5-1	0			
1-4-8-12-16-19-21	10-5-4-3-2-10-1	0			
1-4-8-7-11-19-21	10-5-4-4-10-10-1	0			

## 5 结语

基于搜索的独立通路按最大阻力路线的思想,提出了通风网络自适应优化调节算法,该算法具有以下优点:

1)对含有割边和割点的特殊网络进行处理,可以搜索复杂通风网络的独立通路,实现了相应的算法,具有较快的搜索速度。

2)通路搜索过程中采取记忆搜索策略,加快了通路搜索速度,同时有利于保证通路的独立性;算法适用于具有多进出风井和存在单向回路的通风网络。

3)提出的自适应通路调节法可以获得 1 棵具有最优调节位置的最佳通路调节树,从而得到 1 组最优增阻调节解;同时,算法按最大阻力路线进行调节,可以优化通风网络调节功耗。

## 参考文献:

- [1] HAYK GRIGORYAN, HOVHANNES A HARUTYUNYAN. The shortest path problem in the Knödel graph[J]. *Journal of Discrete Algorithms*, 2015, 31:40-47.
- [2] PAUL BONSMMA. The complexity of rerouting shortest paths[J]. *Theoretical Computer Science*, 2013, 510:1-12.
- [3] 郑海虹. 常用最短路径算法分析与比较[J]. *安徽电子信息职业技术学院学报*, 2013(4):31-33.
- [4] 孙智帅, 谢政, 陈攀. 独立路径问题的算法设计[J]. *计算机工程*, 2013, 39(8):142-146.
- [5] 孙智帅, 谢政. 寻找独立路径问题的一个关键顶点和一条关键弧[J]. *应用数学学报*, 2014, 37(3):516-526.
- [6] 刘剑, 贾进章, 于斌. 通风网络含有单向回路时的通路算法[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2003(6):721-724.
- [7] 魏连江, 周福宝, 朱华新. 通风网络拓扑理论及通路算法研究[J]. *煤炭学报*, 2008(8):926-930.
- [8] CHEN K, SI J, ZHOU F, et al. Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(1):79-84.
- [9] 库向阳, 常新坦, 孙艺珍. 基于遗传算法的通风网络两步法风流调节优化算法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(9):2729-2736.
- [10] 刘剑, 贾进章, 刘新. 用独立通路法确定矿井通风网络的极值流[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2003(4):433-435.
- [11] 陈长华. 用通路法确定通风网络最优断面与风压[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2003(4):448-449.
- [12] 徐瑞龙, 施圣荣. 矿井通风按需调节的通路法[J]. *阜新矿业学院学报*, 1984(3):21-30.
- [13] 边辰通. 在简单无向图中查找所有割边的算法[J]. *中国科技信息*, 2013(3):54-55.
- [14] BARNAT J, CHALOUPKA J, VAN DE POL J. Improved distributed algorithms for scc decomposition[J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2008, 198(1):63-77.
- [15] 陈开岩. 矿井通风系统优化理论及应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.

### Optimal Regulating Position in Ventilation Network Based on the Improved Independent Path Algorithm

ZHONG Deyun<sup>1,2</sup>, LIU Yulong<sup>1</sup>, WANG Liguang<sup>1,2</sup>, BI Lin<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Changsha DIMINE Co., Ltd., Changsha 410221, China)

**Abstract:** Since the independent path with so many applications in the ventilation network, it's significant to search a quick algorithm in the complex network, which can optimize the regulation of ventilation network effect. However, the traditional algorithm of independent path can't deal with special network search problem, the paths tending to be long, which can't assure the independence and completeness simultaneously. To solve the problems of traditional independent path search algorithms, the key search theory of independent path was studied systematically and thoroughly. Based on the analysis about the limitation of traditional algorithms, an improved algorithm of independent path was presented. The problem of cut edge and cut vertex in the network were handled to avoid the infinite loop or abortion. The failure cause of the search of independent path completeness was analyzed. And this algorithm can solve the problems of ventilation network that includes unidirectional circuit by modifying the memory search strategy. An adaptive method is proposed according to the improved independent path algorithm, which can get a regulation tree with optimized position and get a set of optimal solutions of the air quantity regulation through increasing resistance.

**Key words:** independent path; network regulation; unidirectional circuit; cut edge; cut vertex; BFS; memory search strategy