

# 多源点突发灾害事故应急疏散模型与算法<sup>①</sup>

张江华<sup>1, 2</sup>, 刘治平<sup>3</sup>, 朱道立<sup>2</sup>

(1 山东大学管理学院, 济南 250100 2 复旦大学管理学院, 上海 200433

3 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100080)

**摘要:** 突发灾害事故的应急疏散是减少生命财产损失, 特别是减少群死群伤事故发生的有效手段. 以往的研究忽视了多源点间疏散的相互影响, 使得疏散线路的安排不太合理. 同时考虑存在有优先顺序的多源点和容量限制情形下的应急疏散问题, 建立了多源点疏散模型, 设计了基于图论中网络优化思想的启发式算法. 该算法引入  $K$  短路概念, 并行处理多源点多线路的疏散过程, 实时更新网络容量, 从而得出满意的疏散线路和最短的疏散时间, 并分析了算法复杂性, 最后通过算例验证了该算法的有效性和可行性.

**关键词:** 突发灾害事故; 应急疏散; 多源点疏散;  $K$  短路; 算法.

**中图分类号:** O157.6 X913.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2009)03-0111-08

## 0 引言

我国是世界上少数灾害种类最多的国家之一, 地震、洪涝、台风、沙尘暴等自然灾害和火灾、交通事故、化学事故等频繁发生, 特别是随着全球气候的异变和科技的高度发展, 各种突发灾害事故有加重的趋势<sup>[1]</sup>, 例如: 2005年3月29日在京沪高速公路淮安段发生的液氯泄漏事故, 造成1万余人紧急疏散, 27人死亡, 285人中毒; 2008年5月12日发生的四川汶川特大地震, 据总参谋部报告, 截至8月11日12时, 抢险救灾人员已累计解救和转移1486197人, 据民政部报告, 地震已确认69225人遇难, 374640人受伤, 17939人失踪.

为了及时、科学、有效的应对突发灾害事故, 国内外学者进行了一些卓有成效的研究<sup>[2~6]</sup>, 主要集中于应急机构选址、应急资源调度、救灾物资发放和应急疏散等方面. 而突发灾害事故情况下的应急疏散决策是减少生命财产损失, 特别是减少群死群伤事故的关键. 因此, 需特别加强

突发灾害事故的应急疏散研究. 关于应急疏散的研究最早出现在20世纪60年代, Givens<sup>[7]</sup>探讨了疏散决策的一般概念和框架. 此后许多学者运用不同的方法对应急疏散问题进行了研究, 主要分为微观模型和宏观模型两大类, 其中微观模型是通过模拟待疏散人员的行为和人的恐慌心理对疏散路径选择的影响等来进行试验分析的, 典型的微观模型有: 社会力模型<sup>[8]</sup>, 元胞自动机模型<sup>[9, 10]</sup>, 概率模型<sup>[11]</sup>等, 但微观模型着重于对个体的研究, 不能较好的反映疏散区域内的整体疏散情况, 因此不利于为政府相关部门的制定应急预案和指挥应急疏散提供参考依据. 本文的研究内容归为第二类, 即将所有待疏散人员看作一个类似的群组进行宏观研究, 宏观模型能够比较完整的描述实际疏散情况, 能够明确的指导应急预案的制定和确定应急疏散过程中疏散路线.

Hanacher和Tjandra<sup>[3]</sup>对疏散问题的宏观模型进行了综述, 列出的模型主要应用于建筑物火灾事故的疏散, 将时间作为最主要的考虑因素, 给

① 收稿日期: 2007-11-15; 修订日期: 2009-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(70432001; 70832005); 国家自然科学基金资助项目(70673012); 教育部人文社会科学项目(06JA630018).

作者简介: 张江华(1978—), 男, 江苏泰兴人, 博士. Email: zhang.jianghua28@anail.com

出了疏散问题的最大流、最速路、最速流等多个数学模型; Hamacher和 Tjandra<sup>[12]</sup>用动态网络流描述了疏散问题,建立了最快流疏散模型,并给出了单源点疏散算法; Campos等人<sup>[13]</sup>基于图论中最短路算法,以路线集合内总通行能力与旅行时间比值最大化为目标,求出了核电站的事故点至接收点的  $k$  条相互独立的疏散路线. Gupta和 Yadav<sup>[14]</sup>设计了基于网络优化理论的 SAFE-R 算法,该算法应用图论的方法确定用于疏散的线路,动态的计算每条弧的实时流量,并将结果与 EVACNET+ 进行了比较; 温丽敏和陈宝智<sup>[15]</sup>研究了毒气泄漏事故疏散问题,为每条路线定义了一个“当量长度”,求得了  $k$  条当量长度最短的疏散路线; 高明霞和贺国光<sup>[16]</sup>将交叉口分方向延误和通行能力作为节点权重,建立了点权交通网络中的最小费用流疏散模型; 袁媛等人<sup>[17]</sup>考虑了灾害扩散的实时影响,将疏散网络中各弧段上的通行速度表示为随时间的连续递减函数,建立了应急疏散路径选择模型; Qingsong Lu等人<sup>[18,19]</sup>考虑疏散网络的容量约束,将容量约束用时间序列方式进行描述,并提出求解该问题的思路,但没给出数学模型. 以上这些研究多考虑单源点的疏散模型,没有涉及带优先顺序的多源点疏散问题,但是在实际突发灾害事故的应急疏散时,常常出现多源点同时需要疏散的情形,而且由于各源点的受灾程度的不同,各源点的待疏散人员也有不同的优先顺序. 为此,本文同时考虑了有优先顺序的多源点和容量限制的疏散情况,给出了多源点疏散模型,并设计了基于图论中网络优化思想的启发式算法,分析了算法的复杂性,最后给出算例验证了该算法的有效性和可行性.

# 1 问题描述

## 1.1 问题假设

不同突发灾害事故有着各自的不同特性,相应的事故应急疏散也有着不同情景,本文考虑的多源点疏散模型有如下假设:

- 1)假设所有的待疏散人员能完全听从指挥,能按预先制定的疏散计划完成疏散行动;
- 2)假设网络中疏散人员在各条弧上具有正常的平均步行速度,即每条弧上的旅行时间为

常数;

- 3)假设各源点因受灾程度的不同有着不同的疏散顺序;
- 4)疏散网络中弧和顶点有容量限制,容量可以在 0 到最大允许范围内变化;
- 5)疏散过程中只允许交叉节点有延迟;
- 6)疏散过程中不允许返回和绕圈现象出现;
- 7)路段满足先进先出 (FIFO) 规则;
- 8)网络中流量满足流量守恒规则.

## 1.2 符号和决策变量

$G = (V, E)$ : 疏散网络;

$V$ : 顶点集,其中包括三个子集,源点集  $S = \{S_a \mid a = 1, 2, \dots, A\}$ , 交叉节点集  $N = \{N_b \mid b = 1, 2, \dots, B\}$ , 安置点集  $D = \{D_r \mid r = 1, 2, \dots, R\}$ ;

$D_0$ : 超级终点,与所有安置点  $D_r \in D, (r = 1, 2, \dots, R)$  相连,并设  $t_{00} = 0, C_{00} = \infty$ ;

$E$ : 弧集,其中  $e_{ij}$  表示顶点  $n_i, n_j$  间的弧 ( $n_i, n_j \in V$ );

$\lambda_a$ : 疏散源点  $S_a$  的优先系数;

$ICS_a$ : 源点  $S_a$  的初始容量 (初始待疏散人数);

$M CN_i$ : 顶点  $n_i$  的最大容量 ( $n_i \in V$ );

$M C_{ij}$ : 弧  $e_{ij}$  的最大容量;

$C N_i(t)$ :  $t$ 时刻顶点  $n_i$  的容量 ( $n_i \in V$ );

$C_{ij}(t)$ :  $t$ 时刻弧  $e_{ij}$  的容量;

$t_{ij}$ : 通过弧  $e_{ij}$  的旅行时间;

$t_a^k(n_i)$ : 源点  $S_a$  的第  $k$ 条路上源点至  $n_i$  的总旅行时间;

$T_0$ : 各源点疏散起始时间;

$T_a$ : 源点  $S_a$  处疏散结束时间;

$T$ : 疏散网络疏散结束时间;

$P_a^k$ : 源点  $S_a$  的第  $k$ 条路;

$f_a^k$ : 源点  $S_a$  的第  $k$ 条路  $P_a^k$  的流量;

$n_{aa'}^{kl}$ : 源点  $S_a$  的第  $k$ 短路与源点  $S_{a'}$  的第  $l$ 短路的交汇点,其中源点  $S_{a'} (a' = 1, 2, \dots, a-1)$  的优先级大于源点  $S_a$  的优先级;

$x_{ij}^{(a)}(t)$ :  $t$ 时刻进入弧  $e_{ij}, t + t_{ij}$  到达顶点  $n_j$  的来自源点  $S_a$  的人数;

$y_i^{(a)}(t)$ :  $t$ 时刻顶点  $n_i$  上来自源点  $S_a$  的人数.

## 1.3 模型建立

$$\min \sum_{t=0}^T \sum_{a \in S} \sum_{i \in D} \lambda_a x_{i0}^{(a)}(t) \tag{1}$$

$$\text{s t } y_a^{(a)}(0) = ICS_a \quad (2)$$

$$y_i^{(a)}(0) = 0 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$x_{ij}^{(a)}(0) = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{a=1}^A y_i^{(a)}(t) \leqslant MCN_i \quad (5)$$

$$\sum_{a=1}^A x_{ij}^{(a)}(t) \leqslant MC_{ij} \quad (6)$$

$$y_i^{(a)}(t) \leqslant MCN_i - \sum_{a'=1}^{a-1} y_i^{(a')}(t) \quad (7)$$

$$x_{ij}^{(a)}(t) \leqslant MC_{ij} - \sum_{a'=1}^{a-1} x_{ij}^{(a')}(t) \quad (8)$$

$$\sum_{n_i \in V} y_i^{(a)}(t) + \sum_{e_j \in E} x_{ij}^{(a)}(t) = ICS_a \quad (9)$$

$$y_i^{(a)}(t+1) - y_i^{(a)}(t) = \sum_{k \in pred(i)} x_{ki}^{(a)}(t - t_{ki}) - \sum_{j \in succ(i)} x_{ij}^{(a)}(t) \quad (10)$$

$$x_{ij}^{(a)}(t) \geqslant 0, y_i^{(a)}(t) \geqslant 0 \quad (11)$$

$$pred(i) := \{j \mid (j, i) \in E\}$$

$$succ(i) := \{j \mid (i, j) \in E\} \quad (12)$$

其中目标函数 (1) 表示整个疏散网络的所有待疏散人员全部出清的时间. 约束函数 (2)、(3)、(4) 表示整个疏散网络的初始状态; (5)、(6) 表示  $t$  时刻顶点  $n_i$  和弧  $e_j$  的容量限制约束; (7) 表示在  $t$  时刻顶点  $n_i$  满足各源点的优先顺序, (8) 表示在  $t$  时刻弧  $e_j$  满足各源点的优先顺序; (9) 表示  $t$  时刻整个疏散网络的疏散人数守恒; (10) 表示疏散满足先进先出准则; (11) 表示决策变量非负.

## 2 算 法

### 2.1 算法思路

由于疏散问题是 NP-hard 问题, 不存在多项式算法<sup>[31]</sup>, 本文基于图论中网络优化的思想<sup>[20]</sup>, 针对上述数学模型中的约束条件和目标, 设计了实时动态并行处理多源点疏散的启发式算法. 考虑到各源点存在不同的优先顺序, 而各安置点的地位是一样, 引入超级终点的概念<sup>[20]</sup>, 将多源点多终点问题转化为多源点单终点的问题, 使问题的复杂性降低, 减少算法的计算时间. 考虑到紧急状态下, 疏散过程中的群聚现象和疏散人员的从众心理<sup>[8]</sup>, 引入  $K$  短路概念,  $K$  短路就是指源点至安置点的第  $1, 2, \dots, K$  最短路, 在设计疏散线路

时, 只考虑在  $K$  条最短路上进行疏散, 而不是在所有的线路上进行疏散.

由于顶点和弧有容量限制, 很难用静态网络来表示不同时刻疏散人员在各弧上的移动, 本文参考文献 [14] 提出用基于离散时间的动态流表示不同时刻疏散人员在各弧上的移动, 如假设弧  $e_j$  的最大容量为 3 单位, 旅行时间为 4 单位时间, 则基于离散时间的动态弧流量如图 1 所示.

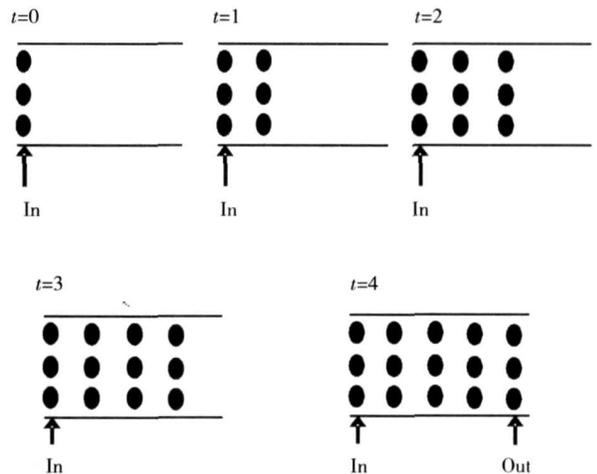


图 1 基于离散时间的弧流量描述

Fig 1 Description of arc flow based on the discrete time

算法的基本思路是: 对于给定的疏散网络, 首先计算出各源点  $S_a$  的  $K$  短路及其流量, 并记录下不同源点间的最短路的交汇点, 然后基于离散时间对所有源点的  $K$  条短路进行疏散, 实时动态更新网络容量, 不断在新的网络中并行处理所有源点的  $K$  条短路的疏散情况, 直至所有源点的所有人员都疏散完毕.

### 2.2 算法步骤

根据算法思路, 构造如下启发式算法:

#### 步骤 1 初始化

给出不同源点  $S_a$  的优先次序, 按优先程度高至低依次排序  $a = 1, 2, \dots, A$ ;

给定各源点  $S_a$  的初始待疏散人数  $ICS_a$ , 顶点  $n_i$  的最大容量  $MCN_i$ , 弧  $e_j$  的最大容量  $MC_{ij}$ ;

增加  $D_0$  为超级终点, 连接各应急安置点, 并设  $t_0 = 0, C_{t_0} = \infty$ ;

令  $t$  时刻顶点  $n_i$  的容量  $CN_i(t) = MCN_i$ ,  $t$  时刻弧  $e_{ij}$  的容量  $C_{ij}(t) = MC_{ij}$ ;

令  $t = 0$

步骤 2 计算出源点  $S_a (a = 1, 2, \dots, A)$  的  $K$

短路,并记录不同源点路线间的交汇点

步骤 2 1 若应用 Dijkstra 算法求出  $S_a$  到  $D_0$  的第  $k$  条短路,记为  $P_a^k = \{S_{a0}, n_{a1}^k, n_{a2}^k, \dots, n_{ah}^k, D_0\}$ , 求出其流量  $f_a^k$  和总耗时  $t_a^k(D_0)$ ;

步骤 2 2 若  $k = K$ , 则转步骤 2 3 否则, 计算  $MC_{ij} = MC_{ij} - f_a^k, MCN_i = MCN_i - f_a^k$ , 其中, 若  $MC_{ij} = 0$  则在网络中删除弧  $e_{ij}$ , 若  $MCN_i = 0$  则在网络中删除与顶点  $n_i$  相连所有前向弧, 更新网络, 若更新的网络不连通, 则转步骤 2 3 否则, 令  $k = k + 1$ , 转步骤 2 1;

步骤 2 3 按先后顺序依次记录不同源点的短路间的交汇点  $n_{aa'}^{kl}$ , 由于是源点  $S_a$  的第  $k$  短路和源点  $S_{a'}$  的第  $l$  短路的交汇点, 所以交汇点  $n_{aa'}^{kl}$  最多只有一个;

步骤 3 分别从源点  $S_a (a = 1, 2, \dots, A)$  的  $K$  条路开始疏散

步骤 3 1  $T_0 = 0, a = 1$  to  $A$ , 对  $S_a$  开始疏散;

步骤 3 2  $k = 1$  to  $K$ ,  $K$  条短路同时疏散;

第  $k$  条路  $P_a^k = \{S_{a0}, n_{a1}^k, n_{a2}^k, \dots, n_{ah}^k, D_0\}$ , 流量为  $f_a^k$ , 其中  $f_a^k = \min\{C_{ij}(t), e_{ij} \in P_a^k \text{ 且 } t \text{ 时刻}, e_{ij} \in E\}$ ,

$t = T_0, j = 0$  to  $h$ , 其中,  $h$  表示源点  $S_a$  的第  $k$  短路  $P_a^k = \{S_{a0}, n_{a1}^k, n_{a2}^k, \dots, n_{ah}^k, D_0\}$  中超级终点前一点  $n_{ah}^k$  的下标号, 实时更新网络容量;

步骤 3 3 判断源点  $S_a$  是否与优先级更高的源点  $S_{a'} (a' = 1, 2, \dots, a - 1)$  的短路间有交汇点

步骤 3 3 1 若与优先级更高的源点  $S_{a'} (a' = 1, 2, \dots, a - 1)$  的短路间没有交汇点, 则,  $t' = t + t_{ajaj+1}, C_{ajaj+1}(t) = C_{ajaj+1}(t) - f_a^k, CN_{aj+1}(t) = CN_{aj+1}(t) - f_a^k$ , 转步骤 5

步骤 3 3 2 若与优先级更高的源点  $S_{a'} (a' = 1, 2, \dots, a - 1)$  的短路间有交汇点, 则转步骤 4

步骤 4 依次对不同源点的短路间交汇点  $n_{aa'}^{kl}$  进行处理

步骤 4 1 比较  $t_a^k(n_{aa'}^{kl})$  和  $t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl})$  大小若  $t_a^k(n_{aa'}^{kl}) < t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl})$ , 则转步骤 4 2 若  $t_a^k(n_{aa'}^{kl}) \geq t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl})$ , 则转 4 3

步骤 4 2 比较  $T_0$  和  $t_a, t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl}) - t_a^k(n_{aa'}^{kl})$  的关系

若  $T_0 \leq t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl}) - t_a^k(n_{aa'}^{kl}) - 1, S_{a'}, S_a$  同时分别疏散  $f_{a'}, f_a$ ;

若  $t_a \geq T_0 \geq t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl}) - t_a^k(n_{aa'}^{kl})$ , 先对  $S_{a'}$  疏散  $f_{a'}$ , 计算  $t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl})$  时间后  $n_{aa'}^{kl}$  至  $D_0$  各路段剩余容量  $C_{ij}(t) - f_{a'}$ , 各顶点剩余容量  $CN_j(t) - f_{a'}$ , 记最小容量为  $C_{aa'}^{kl}$ , 对  $S_a$  疏散  $C_{aa'}^{kl}$ ;

若  $T_0 > t_a, S_{a'}$  疏散结束, 只对  $S_a$  疏散  $f_a$ .

步骤 4 3 比较  $T_0$  和  $t_a$  的大小

若  $T_0 \leq t_a$ , 先对  $S_{a'}$  疏散  $f_{a'}$ , 计算  $t_{a'}^l(n_{aa'}^{kl})$  时间后  $n_{aa'}^{kl}$  至  $D_0$  各路段剩余容量  $C_{ij}(t) - f_{a'}$ , 和顶点剩余容量  $CN_j(t) - f_{a'}$ , 记最小容量为  $C_{aa'}^{kl}$ , 再对  $S_a$  疏散  $C_{aa'}^{kl}$ ;

若  $T_0 > t_a, S_{a'}$  疏散结束, 只对  $S_a$  疏散  $f_a$ .

步骤 5 检查  $S_a$  处是否疏散结束, 若受灾人员都疏散完毕, 则结束, 否则,  $T_0 = T_0 + 1$  返回步骤 3

### 2.3 算法复杂性分析

根据算法步骤, 将总的计算时间划分成静态运算时间和动态运行时间. 在静态时间里, 首先考虑初始化的时间复杂性, 赋初值的时间是  $O(|V| + |E|)$ ; 计算每个源点  $S_a$  的  $K$  短路所用的时间是 Dijkstra 算法的时间  $O(|V|^2)$ , 由于有  $A$  个源点, 所需时间为  $O(A * |V|^2)$ , 更新网络所用的时间为  $O(|V| + |E|)$ ; 在每个交汇点处理所需的时间不超过  $O(A * K)$ , 由于不会超过  $A * K$  个交汇点, 所以处理的时间不会超过  $O(A^2 * K^2)$ ; 另外算法中动态运行时间即源点至终点的旅行时间, 由于是并发的机制, 最坏情况即为如图 3 所示的情况, 即对源点  $S_a (a = 1, 2, \dots, A)$  所有源点共用一条应急线路, 最长的运行时间是  $A * t_a^k(D_0)$ , 处理时间不超过  $O(|E|^2)$ ;

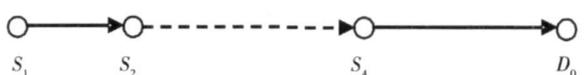


图 3 并发机制下最坏疏散情况

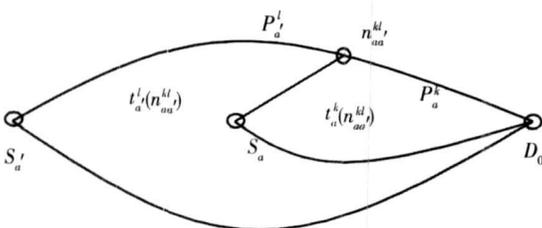


图 2 不同源点的短路间的交汇点

Fig 2 Intersection of shortest path of different source

Fig 3 Evacuation of the worst under parallel mechanism

由于是并发机制, 上述两种划分不一定完全没有交集, 但最差情况即为上述时间之和, 即总的处理时间不超过  $O(|V|^2 + |E|^2)$ , 表明算法能在有限步终止.

### 3 算 例

下面将通过算例来验证算法的有效性和可行性.

例: 疏散网络如图 4 所示, 其中,  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别代表疏散源点, 各源点的优先顺序为  $S_1 > S_2 > S_3$ ;  $D$  代表超级应急安置点; 其余顶点代表弧交叉点. 边上的第一个数字为相应弧的最大容量, 第二个数字为通过弧所需的旅行时间. 初始待疏散人数源点  $S_1$  处为 25 单位, 源点  $S_2$  处为 30 单位, 源点  $S_3$  处为 25 单位. 为了简化问题, 假设所有顶点的最大容量足够大.

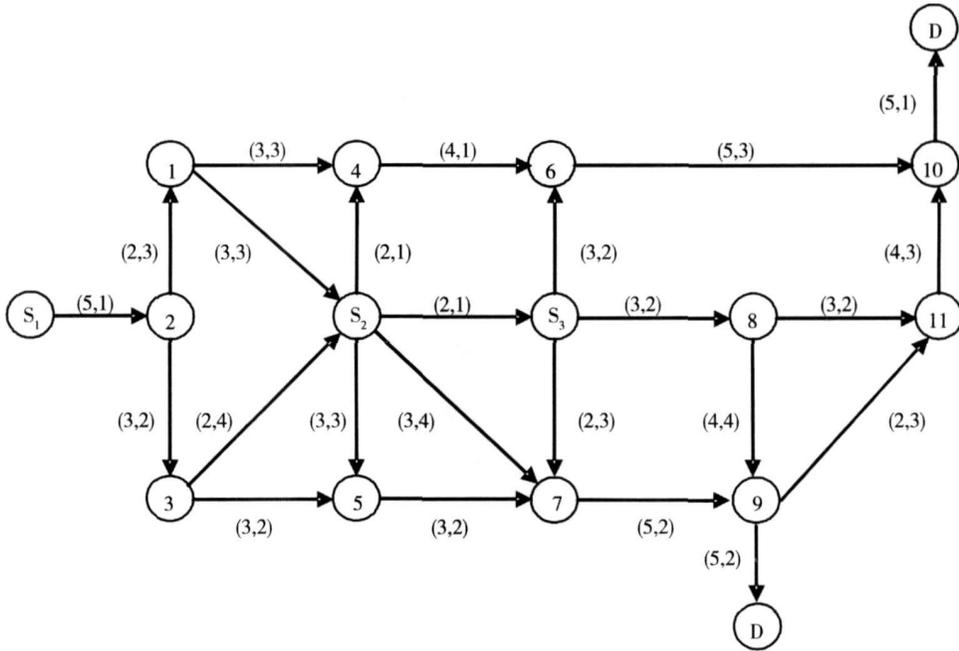


图 4 疏散网络图

Fig 4 Evacuation network

应用上述算法进行求解:

首先, 初始化:

给出各源点的优先顺序、初始待疏散人数  $ICS_{S_a}$ , 弧  $e_{ij}$  的最大容量  $MC_{ij}$  和旅行时间  $t_{ij}$ ; 令  $t$  时刻顶点  $n_i$  的容量  $CN_i(t) = MCN_i$ ,  $t$  时刻弧  $e_{ij}$  的容量  $C_{ij}(t) = MC_{ij}$ ; 令  $t = 0$

应用 Dijkstra 算法求出源点  $S_a$  ( $a = 1, 2, \dots, A$ ) 到  $D$  的  $K$  短路, 令  $K = 3$  计算结果如表 1 所示, 记录不同源点的短路间的交汇点.

第 2 个源点与第 1 个源点的最短路间的交汇点有  $n_{21}^{12} = 4$ ,  $n_{21}^{22} = 6$ ,  $n_{21}^{31} = 7$

第 3 个源点与第 2 个源点的最短路间的交汇点有  $n_{32}^{11} = 6$ ,  $n_{32}^{12} = S_3$ ,  $n_{32}^{23} = 7$

对不同源点的不同短路同时进行疏散, 得出如

表 2 所示的疏散计划.

表 1 各源点的  $K$  短路

Table 1  $K$  shortest path of different source

源点	路线	流量	总耗时
$S_1$	$P_1^1: S_1-2-3-5-7-9-D$	3	11
	$P_2^1: S_1-2-1-4-6-10-D$	2	12
$S_2$	$P_1^2: S_2-4-6-10-D$	2	6
	$P_2^2: S_2-S_3-6-10-D$	2	7
	$P_3^2: S_2-7-9-D$	3	8
$S_3$	$P_1^3: S_3-6-10-D$	3	6
	$P_2^3: S_3-7-9-D$	2	7
	$P_3^3: S_3-8-11-10-D$	3	8

表 2 各源点相应的疏散计划  
Table 2 Evacuation plan of different source

源点	开始时间	线路	疏散人数	总时间	源点	开始时间	线路	疏散人数	总时间
S <sub>1</sub>	0	S <sub>1</sub> -2-3-5-7-9-D	3	11	S <sub>2</sub>	2	S <sub>2</sub> -4-6-10-D	2	8
S <sub>1</sub>	0	S <sub>1</sub> -2-1-4-6-10-D	2	12	S <sub>2</sub>	2	S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> -6-10-D	2	9
S <sub>2</sub>	0	S <sub>2</sub> -4-6-10-D	2	6	S <sub>2</sub>	2	S <sub>2</sub> -7-9-D	3	10
S <sub>2</sub>	0	S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> -6-10-D	2	7	S <sub>3</sub>	2	S <sub>3</sub> -6-10-D	1	8
S <sub>2</sub>	0	S <sub>2</sub> -7-9-D	3	8	S <sub>3</sub>	2	S <sub>3</sub> -7-9-D	2	9
S <sub>3</sub>	0	S <sub>3</sub> -6-10-D	3	6	S <sub>3</sub>	2	S <sub>3</sub> -8-11-10-D	3	10
S <sub>3</sub>	0	S <sub>3</sub> -7-9-D	2	7	S <sub>1</sub>	3	S <sub>1</sub> -2-3-5-7-9-D	3	14
S <sub>3</sub>	0	S <sub>3</sub> -8-11-10-D	3	8	S <sub>1</sub>	3	S <sub>1</sub> -2-1-4-6-10-D	2	15
S <sub>1</sub>	1	S <sub>1</sub> -2-3-5-7-9-D	3	12	S <sub>2</sub>	3	S <sub>2</sub> -4-6-10-D	2	9
S <sub>1</sub>	1	S <sub>1</sub> -2-1-4-6-10-D	2	13	S <sub>2</sub>	3	S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> -6-10-D	2	10
S <sub>2</sub>	1	S <sub>2</sub> -4-6-10-D	2	7	S <sub>2</sub>	3	S <sub>2</sub> -7-9-D	2	11
S <sub>2</sub>	1	S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> -6-10-D	2	8	S <sub>3</sub>	3	S <sub>3</sub> -6-10-D	1	9
S <sub>2</sub>	1	S <sub>2</sub> -7-9-D	3	9	S <sub>3</sub>	3	S <sub>3</sub> -7-9-D	2	10
S <sub>3</sub>	1	S <sub>3</sub> -6-10-D	1	7	S <sub>3</sub>	3	S <sub>3</sub> -8-11-10-D	2	11
S <sub>3</sub>	1	S <sub>3</sub> -7-9-D	2	8	S <sub>1</sub>	4	S <sub>1</sub> -2-3-5-7-9-D	3	15
S <sub>3</sub>	1	S <sub>3</sub> -8-11-10-D	3	9	S <sub>1</sub>	4	S <sub>1</sub> -2-1-4-6-10-D	2	16
S <sub>1</sub>	2	S <sub>1</sub> -2-3-5-7-9-D	3	13	S <sub>2</sub>	4	S <sub>2</sub> -4-6-10-D	2	10
S <sub>1</sub>	2	S <sub>1</sub> -2-1-4-6-10-D	2	14	S <sub>2</sub>	4	S <sub>2</sub> -S <sub>3</sub> -6-10-D	1	11

由表 2 可知整个疏散网络的全部疏散完毕的时间为 16 单位时间. 由于源点 S<sub>1</sub> 的优先级最高, 所以疏散过程中优先疏散源点 S<sub>1</sub> 的待疏散人员, 在 T<sub>0</sub> = 0, 1, 2, 3, 4 时, 源点 S<sub>1</sub> 分别从 P<sub>1</sub><sup>1</sup> 疏散出 3 单位待疏散人员, 从 P<sub>1</sub><sup>2</sup> 疏散出 2 单位待疏散人员; 源点 S<sub>2</sub> 的优先级低于 S<sub>1</sub>, 但由于源点 S<sub>1</sub> 在 T<sub>0</sub> = 0, 1, 2 时出发的疏散人员还未到达顶点 4 和 7, 所以源点 S<sub>2</sub> 分别从 P<sub>1</sub><sup>2</sup> 疏散出 2 单位待疏散人员, 从 P<sub>2</sub><sup>2</sup> 疏散出 2 单位待疏散人员, 从 P<sub>2</sub><sup>3</sup> 疏散出 3 单位待疏散人员, 在 T<sub>0</sub> = 3 由于源点 S<sub>1</sub> 从 P<sub>1</sub><sup>1</sup> 出发的疏散人员在 t = 7 时到达顶点 7, 顶点 7 处优先满足源点 S<sub>1</sub> 的疏散, 所以源点 S<sub>2</sub> 从 P<sub>2</sub><sup>3</sup> 只能疏散 2 单位待疏散人员; 源点 S<sub>3</sub> 的优先级最低, 但由于源点 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 在 T<sub>0</sub> = 0 时出发的疏散人员还未到达顶点 6, S<sub>3</sub> 和 7, 所以源点 S<sub>3</sub> 从 P<sub>3</sub><sup>1</sup> 疏散出 3 单位待疏散人员, 从 P<sub>3</sub><sup>2</sup> 疏散出 2 单位待疏散人员, 从 P<sub>3</sub><sup>3</sup> 疏散出 3 单位待疏散人员, 在 T<sub>0</sub> = 1 时, 源点 S<sub>2</sub> 从 P<sub>2</sub><sup>2</sup> 出发的疏散人员到达 S<sub>3</sub>, 顶点 S<sub>3</sub> 处优先满足源点 S<sub>2</sub> 的疏散, 所以源点 S<sub>3</sub>

从 P<sub>3</sub><sup>1</sup> 只能疏散 1 单位待疏散人员, T<sub>0</sub> = 3 时, 源点 S<sub>2</sub> 从 P<sub>2</sub><sup>3</sup> 出发的疏散人员到达顶点 7, 顶点 7 处优先满足源点 S<sub>2</sub> 的疏散, 所以源点 S<sub>3</sub> 从 P<sub>3</sub><sup>3</sup> 只能疏散 2 单位待疏散人员. 依次循环, 直至所有待疏散人员全部疏散完毕.

此算例表明算法是有效和可行的, 且给出的结果更为详细, 更有利于指导政府相关部门的应急疏散决策.

## 4 结束语

应急疏散是应急预案的核心内容之一, 也是应急救援的关键步骤之一. 研究突发灾害事故下的人员疏散可为科学制定突发灾害事故应急预案及快速、高效进行应急疏散提供必要的指导. 在以往的研究中忽略了多源点间疏散的相互影响, 算法大多是基于静态网络流思想进行设计的, 导致得出的疏散路线不太合理. 本文考虑有优先顺序的多源

点和容量限制情形下的应急疏散问题, 建立了多源点疏散模型, 设计了基于图论中网络优化思想的启发式算法. 该算法引入  $K$  短路概念, 并行处理多源点多线路的疏散过程, 实时更新网络容量, 从而得出满意的疏散线路和最短的疏散时间, 算例结果验证了算法的有效性和可行性. 进一步工作将针对具体突发灾害事故, 如: 危险化学品事故、火灾事故等进行更为细致的研究, 使之更有利于政府相关部门制定科学、有效的应急预案和进行快速、高效的应急疏散.

## 参考文献:

- [1] 王绍玉, 冯百侠. 城市灾害应急与管理 [M]. 重庆: 重庆出版社, 2005.  
Wang Shaoyu, Feng Baixia. Emergency Response and Management of Urban Disaster [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [2] Green L V, Kolesar P J. Improving emergency responsiveness with management science [J]. Management Science, 2004, 50(8): 1001—1014.
- [3] Hamacher H W, Tjandra S A. Mathematical Modeling of Evacuation Problems—A State of the Art [C]. Pedestrian and Evacuation Dynamics, edited by Michael S. Som D S. Berlin: Springer Verlag, 2002. 227—266.
- [4] 方磊, 何建敏. 城市应急系统优化选址决策模型和算法 [J]. 管理科学学报, 2005, 8(1): 12—15.  
Fang Lei, He Jianmin. Optimal location model and algorithm of urban emergency systems [J]. Journal of Management Sciences in China, 2005, 8(1): 12—15. (in Chinese)
- [5] 潘郁, 余佳, 达庆利. 基于粒子群算法的连续性消耗应急资源调度 [J]. 系统工程学报, 2007, 22(5): 556—560.  
Pan Yu, Yu Jia, Da Qingli. Emergency resources scheduling on continuous consumption system based on particle swarm optimization [J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 22(5): 556—560. (in Chinese)
- [6] 吕永波, 贾楠, 任锦鸾, 等. 救灾物资发放问题的动态遗传算法求解 [J]. 管理科学学报, 2008, 11(3): 29—34.  
Lv Yongbo, Jia Nan, Ren Jinluan, et al. Dynamic genetic algorithm for problems of distributing goods to disaster areas [J]. Journal of Management Sciences in China, 2008, 11(3): 29—34. (in Chinese)
- [7] Givens G G. Disaster duty-prepare to evacuate, prime for alert [J]. Traffic Digest and Review, 1963, (11): 4—7.
- [8] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. Nature, 2000, (407): 487—490.
- [9] Kirchner A, Schadschneider A. Simulation of evacuation process using a bionics inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics [J]. Physica A, 2002, 312(1—2): 260—276.
- [10] 宋卫国, 于彦飞, 范维澄, 等. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型 [J]. 中国科学 E, 2005, 35(7): 725—736.  
Song Weiguo, Yu Yanfei, Fan Weicheng, et al. An evacuation cellular automata model considered friction and exclusion [J]. Science in China Ser E, 2005, 35(7): 725—736. (in Chinese)
- [11] Farahmand M, Garetto C, Bellotti E, et al. Monte Carlo simulation of electron transport in the II-V nitride wurtzite phase materials system: Binaries and ternaries [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(3): 535—542.
- [12] Hamacher H W, Tjandra S A. Earliest Arrival Flow Model with Time Dependent Capacity for Solving Evacuation Problems [C]. Pedestrian and evacuation dynamics, edited by Michael S. Som D S. Berlin: Springer Verlag, 2002. 267—276.
- [13] Campos V B G, Silva P A L, Netto P O B. Evacuation transportation planning: A method of identifying optimal independent routes [A]. Surcharov L J. Proceedings of Urban Transport V: Urban Transport and the Environment for the 21st Century [C]. Southampton: WIT Press, 2000. 555—564.
- [14] Gupta A K, Yadav P K. SAFE-R: A new model to study the evacuation profile of a building [J]. Fire Safety Journal, 2004, 39(7): 539—556.
- [15] 温丽敏, 陈宝智. 重大事故人员应急疏散模型研究 [J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(6): 69—73.  
Wen Limin, Chen Baozhi. Study on the model of emergency evacuation in the case of a major accident [J]. China Safety

- Science Journal 1999, 9(6): 69—73 (in Chinese)
- [16] 高明霞, 贺国光. 考虑交叉口特性的疏散交通路线研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 80—83  
Gao Mingxia He Guoguang Optimization of evacuation routes considering movements at intersections[J]. China Civil Engineering Journal 2007, 40(6): 80—83 (in Chinese)
- [17] 袁媛, 汪定伟. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1563—1566  
Yuan Yuan Wang Dingwei Route selection model in emergency evacuation under real time effect of disaster extension[J]. Journal of System Simulation 2008, 20(6): 1563—1566 (in Chinese)
- [18] Lu Q S, George B, Shekhar S. Capacity Constrained Routing Algorithms for Evacuation Planning: A Summary of Results[C]. Advances in Spatial and Temporal Database Proceeding of 9th International Symposium on Spatial and Temporal Databases Heidelberg Springer Berlin 2005. 291—307.
- [19] Lu Qingsong. Capacity Constrained Routing Algorithms for Evacuation Route Planning[D]. Minnesota University of Minnesota 2006
- [20] 拉文德拉 K 阿胡亚, 托马斯 L 马南提, 詹姆斯 B 沃林. 网络流——理论、算法与应用(英文版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Ahuja R K, Magnanti T L, Orlin J B. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications[M]. Beijing: China Machine Press 2005.

## Multi-source emergency evacuation model and algorithm

ZHANG Jiang-hua<sup>1,2</sup>, LIU Zhiping<sup>3</sup>, ZHUDao-li<sup>2</sup>

1. School of Management, Shandong University, Jinan 250100, China

2. School of Management, Fudan University, Shanghai 200433, China

3. Academy of Mathematics & Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** Emergency evacuation of unexpected disasters and accidents is one effective means to reduce the loss of lives and property, especially for the reduction of massive casualties in accidents. Previous studies ignored influence of the interrelated sources on evacuation when there are more than one source, which causes unreasonable evacuation routes. In order to overcome this disadvantage, this paper considers the emergency evacuation problem of multi-sources with the order of priority as well as the capacity constraints. After the multi-source evacuation model is proposed, a novel heuristic algorithm based on network optimization in graph theory is given. By introducing the concept of  $K$  shortest path, the algorithm processes simultaneously the evacuation of multi-sources and multi-routes, and updates network capacity in real-time, therefore it can obtain satisfactory shortest evacuation routes and evacuation time. The computational complexity of the algorithm is also analyzed. Finally, a numerical example is presented to show the effectiveness and feasibility of this algorithm.

**Keywords** unexpected disasters and accidents; emergency evacuation;  $K$  multi-source evacuation;  $K$  shortest path; algorithm