

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.026

城市火灾应急疏散模型研究

田凌, 殷宏, 许继恒, 吴天羿, 王建民
(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

摘要: 针对城市火灾事故中大型公共场所外人员疏散难的问题, 在考虑影响火灾应急疏散因素的基础上, 分析火灾应急疏散的模型, 并以某市体育馆周边道路情况为例, 采用 Dijkstra 算法和区间数网络算法对影响交通道路网的因素进行综合优化, 分析得到最短路径和最小风险路径。结果表明: 该模型的应用可实现三维场景中火灾应急疏散路径的可视化, 可为火灾应急疏散提供决策支持。

关键词: 三维可视化; 应急疏散模型; Dijkstra 算法; 区间数网络算法; 路径算法
中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Study on City Fire Emergency Evacuation Model

Tian Ling, Yin Hong, Xu Jiheng, Wu Tianyi, Wang Jianmin

(Engineering College of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: According to the difficult problem of evacuations outside the large public places in city fire accidents, considering the impact of urban fire emergency evacuation on the basis of factors, analyze the fire emergency evacuation model. And taking as some gymnasium nearby situation as example, use Dijkstra algorithm and interval number network algorithm to comprehensively optimize factors that affect the transportation network. Acquire the shortest path and minimum danger path. The result shows that the application of model can realize the visualization of fire emergency evacuation path in 3D scene and provide decision support for fire accident emergency evacuation.

Key words: 3D visualization; emergency evacuation model; Dijkstra algorithm; interval number network algorithm; path algorithm

0 引言

火灾事故的发生严重危及城市的安全。如何在火灾事故发生后第一时间做出有效反应, 并在最短时间内以最有效的方式尽可能多地疏散灾民, 成为应急救援的首要目标。目前的疏散研究主要侧重于建筑物内部疏散^[1], 例如单源点最快流疏散模型^[2]、SAFE-R 算法^[3]、有节点权重的最小费用流算法^[4]、动态网络疏散模型^[5]和多目标最小费用流模型^[6]等, 而对人群疏散研究较少。因此, 笔者针对火灾事故中, 人口密集的大型公共场所外人员疏散问题, 以研究最短路径和最小风险路径为目标, 结合运筹学相关算法求解优化的疏散方案。

1 应急疏散模型

1.1 应急疏散的基本问题

疏散路线是确定将灾区人员从受灾地点转移到安全地带的路径^[7]。以所有的受灾人员全部被疏散到安全区域为标志来确认完成疏散任务^[8]。因此, 最优路线应该是安全的最小时间路径。对于城市道路, 影响人员或车辆行走速度的因素还有道路的地理位置、平坦程度、道路的宽度和风速等。所以,

在火情紧急时, 应当结合现场的实际情况, 制定合理的疏散方案。

1.2 Dijkstra 算法的基本思想

寻求从一固定起点到其余各点的最短路径的最有效算法之一是 Dijkstra (1959) 算法, 多数改进算法都是对执行 Dijkstra 算法时数据结构方面的改进。Dijkstra 算法是一种标号作业法, 在每次迭代产生一个永久标号。

标号原理: 先找出与疏散源点 u_0 最接近的顶点, 再找出与 u_0 距离最短的 k 个顶点 (包括 u_0), 以及这 k 个顶点到 u_0 的最短距离和最短路径, 它们构成一棵树, 用到 u_0 的最短距离作为这 k 个顶点的永久标号。对每个没有标记的顶点 a , 构成 k 条从 u_0 到 a 的路径, 它是由 u_0 到已标注的顶点 $\chi_i (i=1, 2, \dots, k)$ 的最短路径加上 $\chi_i a (i=1, 2, \dots, k)$ (若 $\chi_i a \notin E(G)$, $\omega(\chi_i, a) = \infty$), 构成路径 $P(u_0, \chi_i) \cup \{\chi_i a\} (i=1, 2, \dots, k)$ 。在这 k 条路径中选出最短的, 暂时作为从 u_0 到 a 的最短路径, 其长度作为 a 的暂时标号。具有最小暂时标号的顶点 a^* 就是第 $k+1$ 最靠近 u_0 的

收稿日期: 2011-11-21; 修回日期: 2011-12-15

作者简介: 田凌 (1986—), 男, 福建人, 在读硕士, 从事系统分析与集成、虚拟现实研究。

顶点。因此，若最接近 u_0 的 k 个顶点已知，则第 $k+1$ 个便可如上确定，从 $k=0$ 开始，这个过程可重复直到所有顶点都有了永久标号。

按上述算法要反复地对已标记的顶点进行计算和比较，加以改进，即在求最短路径的过程中，不断修改未标记的路径参数，于是得到易于编程的算法步骤。

算法步骤：

S 为具有永久标号的顶点集； $\ell(v)$ 为 v 的标记； $f(v)$ 为 v 的父亲，用以确定最短路径(链)。

输入加权图的带权邻接矩阵为：

$$W_{n \times n} = (\omega(u, v))_{n \times n} \quad (1)$$

1) $\ell(v_0) \leftarrow 0 \forall v \neq v_0, \ell(v) \leftarrow \infty, S \leftarrow \{v_0\}, u \leftarrow v_0。$

2) $\forall v \in \bar{S} = V - S$ ，若 $\ell(v) > \ell(u) + \omega(u, v)$ ，则 $\ell(v) \leftarrow \ell(u) + \omega(u, v), f(v) \leftarrow u$

3) 设 v^* 是使 $\ell(v)$ 取最小值的 S 中的顶点，令 $S \leftarrow S \cup \{v^*\}, u \leftarrow v^*。$

4) 若 $\bar{S} \neq \emptyset$ ，转 2)，否则，停止。

1.3 区间数网络最小风险路径的选取

1.3.1 区间数网络算法

为便于研究，可以将受灾区域到安全区域等效为一个边权为区间数的无向赋权图，疏散源点以及容易受到火情威胁的各个区段看成网络中的顶点，从某个顶点到另一个顶点的的时间为不确定值，区段中受到火情影响的指数作为顶点的权重，连接它们的道路看成网络中的弧。

给定一个赋权图 G ，对每一边 e ，对应权值表示为 $\omega(e)$ ，设 R 为从疏散源点 v_s 到安全区域 v_t 的所有路径的集合，若 B 是 G 中从起点到终点的一条路，则 $B \in R$ ，定义路 B 的权为 B 中所有边的权之和，计为 $\omega(B)$ ，即

$$\omega(B) = \sum_{e \in B} \omega(e) \quad (2)$$

求一条从 v_s 到 v_t 的最短路，即求权最小的路 B 。使：

$$\omega(B_0) = \min_B \omega(B) \quad (3)$$

能够完全满足限制期路径的最优集设为 Q ，则 $Q = \{B | \omega(B) \leq t, B \in R\}$ 。显然，当 $\omega(e)$ 为普通实数时，只要看上式求得的最短路 B_0 是否满足

$$\omega(B_0) \leq t \quad (4)$$

定义风险函数 $F(B, t)$ ，表示 $\omega(B)$ 的超期风险，即选择路径 B 所需时间超过 t 的风险，并从风险的角度定义最优目标集 S 。

设最大程度满足限制期(或超期风险最小)路径的最优集为 S

$$S = \{B | \min_{B \in R} F(B, t)\} \quad (5)$$

算法的目标是找出任意一条路径 B^* ，使 $B^* \in S$ 。一个比较直观的方法就是找出所有的路径，通过比较它们的风险函数值大小确定最小风险路径。显然，这种方法计算量太大，对节点个数较多的网络系统，不能满足应急系统的快速反应要求，需要进行优化。

引进一重要的路径形式 $B(x)$ 。把一个较复杂的非线性路径问题，设法转化成一系列的线性路径问题来求解。

$$B(x) = \min_{B \in R} \sum_{e \in B} ((\omega_2(e) - \omega_1(e)) * x + \omega_2(e)) = \sum_{e \in B(x)} ((\omega_2(e) - \omega_1(e)) * x + \omega_2(e)) \quad (6)$$

$$N(x) = \sum_{e \in B(x)} ((\omega_2(e) - \omega_1(e)) * x + \omega_2(e)) \quad (7)$$

让 x 变化，直到 $N(x)$ 等于 t ，此时 x 就是最优值 x^* ，相应的路径 $B(x)$ 即为 B^* 。

1.3.2 算法的思想

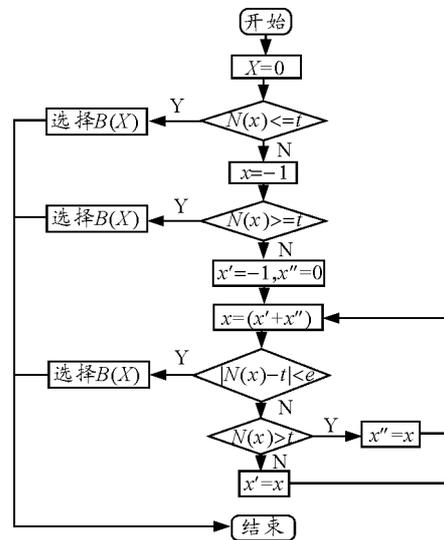


图 1 算法框图

若 $N(0) \leq t$ 或 $N(-1) \geq t$ ，可知： $B(0)$ 为最优路径即 $B(0) \in S$ 。

否则，也就是： $x^* \in (-1, 0)$ ；让 $x' = -1, x'' = 0$ ，令 $x = [x' + x''] / 2$ ；

若 $N(x) > t$ ，则 $x > x^*$ ，此时令 $x'' = x$ ；

若 $N(x) < t$ ，则 $x < x^*$ ，此时令 $x' = x$ ；

这样一直做下去, 终止条件为 $|N(x)-t|<\epsilon$, 此过程保证了迭代过程是收敛的。框图如图 1 所示。

2 算法应用

体育馆作为一种普通的公众聚集场所, 除了进行体育赛事以外, 一些大型的政治集会和文艺演出等也在此举行。体育馆规模大, 人员集中, 使用频率高, 火灾事故发生时, 容易造成大量的人员伤亡。以某市体育馆周边道路情况为例, 考虑火灾时体育馆外大量人员的疏散问题。

2.1 用 Dijkstra 算法求最短路径

确定以体育馆一侧作为集合点, 以文化宫社区作为疏散集结地的疏散方案。火灾发生时, 排除人为影响, 影响疏散效率最重要的因素是路网的容量。当现有路网容量不足时, 必然产生拥挤, 导致疏散时间延长。因此系统应用时, 需要综合考虑路网的容量和车流量等影响因素。为了便于理解, 本例中简化了路径的权值问题, 采用路径的距离作为权值。具体的道路网络如图 2 所示。

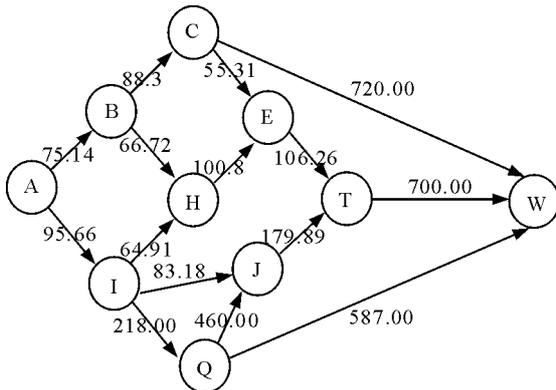


图 2 道路网络生成图

利用标号法, 人工手算出结果。从已标号的点出发, 找与这些相邻点最小权数(距离)者, 标号权数, 边变细虚线。为方便查看, 对边变细虚线后, 下一次找到的边变成粗实线。其过程如图 3 所示。

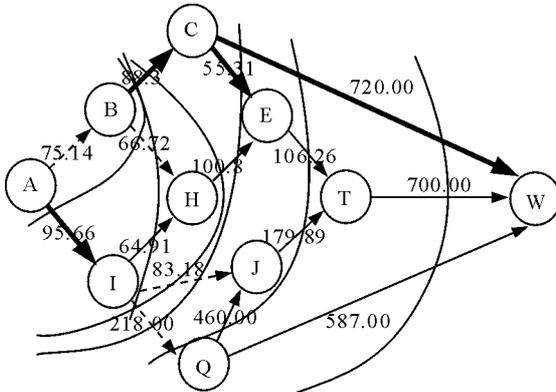


图 3 标号法手算过程图

按照 A-B-C-I-H-E-Q-J-T-W 的顺序编号为 1~10 把以上图转变成邻接矩阵。矩阵化的数据如下:

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}
V_1	0	75.14	∞	95.66	∞	∞	∞	∞	∞	∞
V_2	75.14	0	88.3	∞	66.72	∞	∞	∞	∞	∞
V_3	∞	88.3	0	∞	∞	55.31	∞	∞	∞	720.0
V_4	95.66	∞	∞	0	64.91	∞	218.0	83.18	∞	∞
V_5	∞	66.72	∞	64.91	0	100.8	∞	∞	∞	∞
V_6	∞	∞	55.31	∞	100.8	0	∞	∞	106.26	∞
V_7	218.0	∞	∞	∞	∞	∞	0	460.0	∞	587.0
V_8	∞	∞	∞	83.18	∞	∞	460.0	0	179.89	∞
V_9	∞	∞	∞	∞	∞	106.26	∞	179.89	0	700.0
V_{10}	∞	0								

利用 Matlab 程序来计算这个邻接矩阵, 得到结果如图 4 所示。

```

S=
    1    1    1    1    1    1    1    1
    0    3    3    2    4    2    3    4    4    3
    0    0    6    0    0    5    6    8    7    10
    0    0    0    0    0    0    9    0    0    0

D=0    0    55.3100    75.1400    95.6600    141.8600
    161.5700    178.8400    313.6600    720.0000

ans=
    1    1    1    1    1    1    1    1
    0    3    3    2    4    2    3    4    4    3
    0    0    6    0    0    5    6    8    7    10
    0    0    0    0    0    0    9    0    0    0
  
```

图 4 Matlab 计算结果

三维场景疏散路径示意图如图 5。把 Matlab 的计算结果在三维场景道路网络图上勾画出来, 与手算的结果是吻合的。

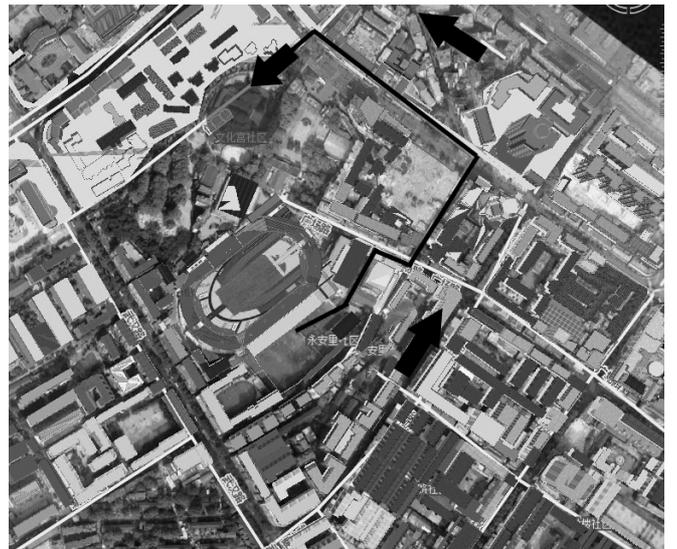


图 5 三维场景疏散路径示意图

2.2 用区间数网络法求最小风险路径

采用宏观模拟法, 需要考虑的影响因素有路网性质、路段容量、道路控制和交叉口管制措施等,

按公式计算各路段的车流流量性质，然后估算路网疏散的时间。

路网疏散的计算模型如下：

$$T = \frac{60Q}{F}$$

式中： T 为所有疏散车辆通过路径的时间，min； Q 为要疏散的车辆总数，pcu； F 为单个路口的交通流量，pcu/h。

由于交通流量是动态的，可根据常态下的交通情况来确定区间数：相对闲时为左端，相对忙时为右端。交通道路的权重值转化成区间数，如图 6。

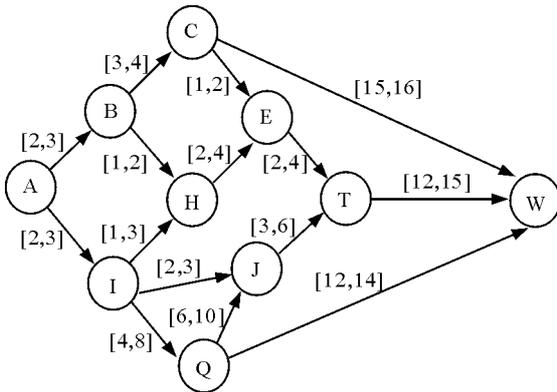


图 6 区间数网络图

采用比较直观的枚举法找出所有的路径，通过比较其中的风险函数值来求解。

按照区间数网络图列出所有路径如表 1 所示。

表 1 网络图对应的所有路径

序号	路径的序列	序号	路径的序列
1	A-B-C-W	6	A-B-H-I-Q-W
2	A-B-C-E-T-W	7	A-I-H-E-T-W
3	A-B-H-E-T-W	8	A-I-J-T-W
4	A-B-H-I-J-T-W	9	A-I-Q-J-T-W
5	A-B-H-I-Q-J-T-W	10	A-I-Q-W

设置时限为 22 m，计算出各条路径的 $F(P,t)$ 的值，如表 2 所示。

表 2 路径风险值的计算

序号	区间的序列	代数之和	$F(P,t)$
1	[2,3]-[3,4]-[15,16]	[20,23]	0.330
2	[2,3]-[3,4]-[1,2]-[2,4]-[12,15]	[20,28]	0.750
3	[2,3]-[1,2]-[2,4]-[2,4]-[12,15]	[19,28]	0.670
4	[2,3]-[1,2]-[1,3]-[2,3]-[3,6]-[12,15]	[21,32]	0.910
5	[2,3]-[1,2]-[1,3]-[3,6] -[6,10]-[3,6]-[12,15]	[28,45]	1.350
6	[2,3]-[1,2]-[1,3]-[3,6]-[12,14]	[19,29]	0.700
7	[2,3]-[1,3]-[2,4]-[2,4]-[12,15]	[19,29]	0.700
8	[2,3]-[2,3]-[3,6]-[12,15]	[19,27]	0.625
9	[2,3]-[3,6]-[6,10]-[3,6]-[12,15]	[26,40]	1.286
10	[2,3]-[3,6]-[12,14]	[17,23]	0.167

从计算结果可以明显看出，A-I-Q-W 为所求的

最优路径，即最小风险路径。

2.3 结果分析

笔者采用 2 种算法，给应急疏散决策者定量分析提供了 2 种不同的思路。Dijkstra 算法求最短路径，案例中的路径权值简单地用路径的距离赋权，具体应用时可以结合路网的容量和车流量等因素对路径权值的影响，设置影响的系数进一步计算每条路径的通过时间，作为路径的最终权值。用区间数网络算法求得最小风险路径，有针对性地考虑了交通流量的动态性，由交通流量计算出每条路径的通过时间，相对闲时和相对忙时作为区间数的两端。2 种方法有各自的特点，Dijkstra 算法作为经典算法已经很成熟地应用到各个领域的计算机模拟，简单网络可用标号法手工计算，复杂的网络可用 Matlab 编程计算。区间数网络算法加入了动态的变量，用限制期作为约束，追求最大程度的满足值。

3 结束语

实例分析结果表明：该模型的应用能实现三维场景中火灾应急疏散路径的分析功能。对疏散路径的选择，采用 Dijkstra 算法和区间数网络算法分析最短路径和最小风险路径并得到计算结果，在城市三维场景中得到了正确的显示，为构建具有高逼真度的城市应急救援三维平台提供了应急疏散决策支持。

参考文献：

- [1] Hamacher H W, Tjandra S A. Earliest arrival flow model with time dependent capacity for solving evacuation problems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 267-276.
- [2] 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: 539-556.
- [3] 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.
- [4] Chalmet L, Francis R, Saunders P. Network model for building evacuation[J]. Management Science, 1982, 28: 86-105.
- [5] Hamacher H W, Tufekci S. On the use of lexico graphiem in cost flows in evacuation modelling[J]. Naval Research Logistics, 1987, 34(9): 487-503.
- [6] 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): 69-72.
- [7] 宋文华, 祝凌云, 李庆功. 城市开放场所应急疏散模型建立初探[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2009, 42(6): 86-91.
- [8] 邓中亮, 王小恒. 一种用于大型建筑火灾中的应急疏散算法[J]. 软件, 2011, 32(2): 112-114.