

文章编号: 1000-582X(2012)06-099-06

## 面向应急疏散的山区特征路网通路分析

宋永朝<sup>1a</sup>, 潘晓东<sup>2</sup>, 梁乃兴<sup>1b</sup>

(1. 重庆交通大学 a. 交通运输学院; b. 土木建筑学院, 重庆 400074;  
2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 针对山区地形地貌特点及山区路网形态特征, 提出了山区特征工字型路网的基本概念; 采用时间成本分析方法, 对山区特征工字型路网的关键通道在相邻两端的周边路网影响范围进行了边界界定; 运用图论及流体网络理论, 对山区特征工字型路网进行了通路分析, 采用引入虚节点和虚分支的方法, 提出了山区特征工字型路网的通路求解方法。通过算例对山区特征工字型路网进行了通路分析及其求解。

**关键词:** 山区路网; 通路算法; 影响范围; 灾害事件; 应急疏散

**中图分类号:** U491.13

**文献标志码:** A

## Pathway Analysis of the Mountainous Characteristic Road Network for Emergency Evacuation

SONG Yong-chao<sup>1a</sup>, PAN Xiao-dong<sup>2</sup>, LIANG Nai-xing<sup>1b</sup>

(1a. School of Traffic & Transportation; b. School of Civil Engineering and Architecture,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;  
2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

**Abstract:** According to conditions of landform in mountain area and features of mountainous road network, a concept of mountainous characteristic I-Shaped road network was presented. By adopting time-cost analysis method, finite impact ranges of key pathway and its adjoining pathway surrounding road networks were defined. Using graph theory and fluid network theory, the analysis of pathways to mountainous characteristic I-Shaped road network was carried out. With the ways of virtual node and virtual branch, pathway algorithm of mountainous characteristic I-Shaped road network was provided. The calculated process of the analysis of pathways to mountainous characteristic I-Shaped road network was illustrated through numerical example, which shows that it provides guidance for determining an optimal route to evacuation and evacuation management in the calamity events.

**Key words:** mountainous road network; pathway algorithm; impact range; disaster affairs; emergency evacuation

近年来世界各地灾害事件频发, 给人类的生存和社会发展构成了重大威胁<sup>[1]</sup>。如何应对突发事

件, 保障公众生命财产安全已成为世界各国的重要议题, 目前, 关于路网应急疏散问题已经成为热

收稿日期: 2012-01-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA11Z220); 重庆市教委基金资助项目(KJ120418)

作者简介: 宋永朝(1975-), 男, 重庆交通大学博士, 主要从事交通安全与环境工程研究, (E-mail) songyc69@163.com。

点<sup>[2]</sup>。应急疏散探讨如何将处于危险地带的人员和车辆尽快移至安全地带,使灾害事件带来的影响和破坏降到最低。

20 世纪 70 年代国外开始了路网应急疏散相关研究,Houston 提出了用于估算疏散时间的疏散率模型<sup>[3]</sup>,Voorhess、Sheffi、Hobeika、Cova、Stepanov 等也相继提出了应急疏散模型<sup>[4-8]</sup>,Hamzalup 运用信息技术改善应急疏散效率<sup>[9]</sup>,Kalafaras 提出了交通疏散的路网规划策略<sup>[10]</sup>;国内学者在路网应急疏散路径选择,人员疏散决策行为、疏散安全距离、应急物资运输保障等方面进行了研究<sup>[11-14]</sup>。鉴于路网形态的多样性、应急疏散的复杂性,目前还没有足够精度并具有普遍适用性的应急疏散计算模型。

灾时山区路网的有效连通是应急处置、紧急救援的有利保证<sup>[15]</sup>,山区的桥梁、隧道、索道等关键通道设施能跨越山谷、河川等障碍物,有效缩短两端交通节点的连通距离。灾时如何提高交通疏散效率和组织管理水平,撤退路径的选择是应急疏散的关键,直接决定着疏散方案的时间效果<sup>[16]</sup>,如何有效发挥山区普遍存在的典型路网的应急疏散效率,凸显其重要性。

笔者根据山区地形特点,综合山区路网布局特征<sup>[17]</sup>,从一个新的研究角度来探讨灾害事件下山区典型局域路网的疏散通路问题。以关键通道设施及其两端周边区域构成的山区特征路网为研究对象,运用图论<sup>[18]</sup>和流体网络理论<sup>[19]</sup>对山区特征路网进行通路分析,进而得出灾时应急疏散最优通路,为灾前或灾时人员疏散、紧急救援的路线诱导及应急疏散管理提供指导。

## 1 山区特征工字型路网的提出

山区的河流峡谷、高山峻岭等天然障碍限制了山区路网的自由伸展,为克服复杂地形而修建的基础交通设施,其修建成本相对较大、建设周期较长、修建条件恶劣。因此,山区路网中为克服地形障碍而修建的重要交通设施通常相隔较大距离,两端路网缺少邻近的辅助通道相连,对于这一基础交通设施可视为一独立通道,将两岸(或山两侧)的路网相连<sup>[20]</sup>,路网形态如图 1 所示。

山区路网中并行或局部并行干线公路之间,多有深谷、急流、高山等天然屏障相隔,其他相连路径相距较远。跨越峡谷穿越河川的关键交通设施连接

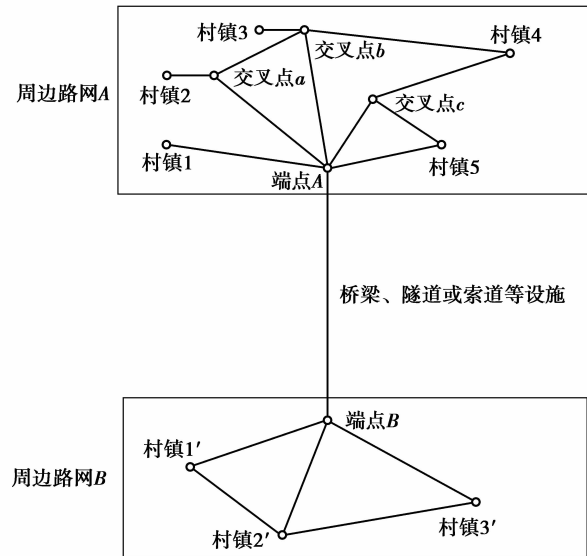


图 1 山区特征工字型路网

着两端路网,平时交通运输过程中成为两端路网连通的必经之处,在灾时应急疏散和救援工作的实施中承担着重要作用。由关键交通设施(如桥梁、隧道、索道等)及其两端的周边路网组成的区域属于中小型路网的范畴,从形式上构成了类似“工”字形状的路网,由于山区地形条件所限,类似于该特征的中小型路网十分普遍。便于区别其它位置或其它形式的路网形态,在此,将交通通道及其两端相连的周边路网命名为工字型路网,图 1 为山区典型的工字型路网。

根据山区地形地貌特征,灾时如何充分利用山区路网系统迅速有效地进行人员疏散和物资输送,对山区特征工字型路网进行通路分析凸显其重要性。为了提高灾害事件下的山区路网应急疏散效率和组织管理水平,以通道及其两端的周边区域组成的具有山区特征的工字型路网为研究对象进行通路分析,为灾害事件下山区应急疏散的路线诱导提供依据。

## 2 山区特征工字型路网的边界分析

在进行通路分析之前,先对山区特征工字型路网中的两端周边路网进行边界分析。通过分析工字型路网的通道设施在相连两端周边路网的影响范围,从而确定灾害事件下工字型路网通路分析的层次和边界范围。

### 2.1 工字型路网构建

山区特征工字型路网由通道设施及其相连两端

的周边路网构成,如图 1 所示,采用图论方法<sup>[18]</sup>,记为  $G^*$

$$G^* = G + G_A + G_B, \quad (1)$$

式中, $G$  为通道设施(桥梁、隧道、索道等): $G = \{V, E\}, V = \{v_0, v_1\}, E = \{e_0\}$ ;  $G_A, G_B$  为周边路网: $G_A = \{V_A, E_A\}, v_0 \in V_A, G_B = \{V_B, E_B\}, v_{SI} \in V_B$ ;  $v$  为节点(村镇、交叉点、应急疏散处等);  $e$  为节点之间的连线路径,即具有一定长度的道路路段。

### 2.2 时间成本分析

山区地形障碍(如深谷、急流)两端路网由通道以及其他相邻连线相连,某山区局域路网如图 2 所示。出行者期望寻找一条跨越障碍到达另一端最短路径,文中从个体的角度出发,考虑其行程时间成本,从而确定通道对其相连端周边路网的影响范围。设通道  $M$  与相邻连线  $N$  之间存在分隔边界,该边界位置既可以选择  $M$  也可以选择  $N$  越障碍到达另一端,从经济的角度来认为,这 2 种路径的选择具有相同的成本效益。

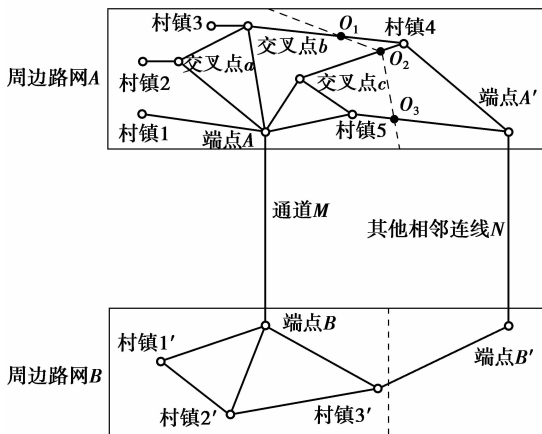


图 2 通道设施及周边局域路网

假设时间成本函数与流量无关,其成本函数为: $C_M = C(l_M), C_N = C(l_N)$ 。以  $O_1 - O_2 - O_3$  为例,点  $O_1, O_2, O_3$  分别通过  $M$  到达端点  $B$  与通过  $N$  到达端点  $B'$  具有相同的时间成本: $C_M(O_1) = C_N(O_1), C_M(O_2) = C_N(O_2), C_M(O_3) = C_N(O_3)$ 。即  $O_1 - O_2 - O_3$  为工字型路网  $A$  端的边界。组成的路径种类、等级不同时,空间距离不便于分析处理,将空间距离  $l$  转化为相应的时间距离  $l_t$ ,即  $l_t = \sum_i l_i / v_i$ ,其中  $l_i$  为路径中路段  $i$  的长度,  $v_i$  为路段  $i$  相应的行程速度。

## 3 山区特征工字型路网的通路分析

### 3.1 路网通路算法介绍

工字型路网两端的交通节点通常由车道(或步道)相连,确定局域路网中各节点及各节点之间的相连路径,列出各通道及节点的拓扑关系。基于流体网络理论<sup>[19]</sup>采用节点邻接矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times m}$  表示:其中  $a_{ij}$  为 1 时表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  连通,且流向从  $i$  到  $j$ ;  $a_{ij}$  为 -1 时表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  连通,且流向从  $j$  到  $i$ ;  $a_{ij}$  为 0 时表示节点  $v_i$  与节点  $v_j$  不连通。为避免歧义和方便求解,构建路网求解时,根据交通流向可将路网进一步简化为单向流体网络图。对于无向图  $G = \{V, E\}, V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}, E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,无向图节点邻接矩阵  $A$  为  $m = |V|$  阶方阵  $A = (a_{ij})_{m \times m}$ ,其中  $a_{ij} = |\{e_k | e_k = [v_i, v_j] \in E\}|$ 。

根据总体流向趋势对工字型路网进行路网简化,可以简化为多源一汇或一源多汇型路网。对于流向趋势无法明确判定的路段,通过增加虚节点和虚分支,使路网最终形成单一流向路网,确保任意两节点之间分支的唯一性。由于虚节点、虚分支的引入,在求解的通道中出现回路现象时,应该将该结果直接舍弃,在分析虚分支时,其行驶时间、距离参数均为零。

流体网络  $G = \{V, E\}$  的源点  $V^-(G)$  与汇点  $V^+(G)$  之间的全部通路  $P_1, P_2, \dots, P_s$  (其中  $S$  为网络的全部通路数)的通路矩阵表示为

$$P = (p_{ij})_{s \times n}, \quad (2)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & (e_j \in P_i) \\ 0, & (e_j \notin P_i) \end{cases} \quad (3)$$

对于有向流体网络图  $G = \{V, E\}, m = |V|, n = |E|, v_i$  到  $v_j$  的全部通路数为

$$S = \sum_{k=1}^{m-1} a_{ij}^k = a_{ij}^1 + a_{ij}^2 + \dots + a_{ij}^{m-1}, \quad (4)$$

其中,  $a_{ij}^k$  是  $A^k$  中的第  $i$  行第  $j$  列的元素,而  $A^k = AA^{k-1}$  是无向图节点邻接矩阵  $A$  相乘  $k$  次。运算矩阵直至  $A^k = 0, A^k$  的  $(i, j)$  元素表示节点  $i$  到节点  $j$  要经过  $k$  条路段的具体方式。

分析网络中的全部通路数时,则要把各网络源点与汇点之间的全部通路求和,即路网所有进入点与离去点之间的全部通路求和。计算公式如下:

$$S = \sum_{k=1}^{m-1} a_{ij}^k, (i \in \{i | v_i \in V^-(G)\}, j \in \{j | v_j \in V^+(G)\}). \quad (5)$$

通路矩阵  $P$  可以通过展开节点邻接矩阵  $A$  对应的  $A^c$  的余子式获得。将各路段元素  $e$  带入节点邻接矩阵  $A$ , 即得到对应的  $A^c$ , 令  $U = A^c + I$ ,  $I$  为单位矩阵, 对  $U$  取行列式  $|U|$ , 展开  $|U|$  中的  $u_{ji}$  对应的余子式即可求得  $v_i, v_j$  之间的所有通路。山区特征路网的通路算法的分析步骤相对简捷, 通路求解可通过编写程序代码在 Matlab 软件中运算分析, 即可得出复杂路网通路分析的计算结果。

### 3.2 算例

以图 2 为例, 阐述山区特征工字型路网通路算法的计算过程。对图 2 进行简化: 周边路网总体流向趋势拟定为周边路网  $A \rightarrow B$ , 将其局域路网简化成单向网络图(见图 3), 记  $G = (V, E)$ , 其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{14}\}$ ,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{17}\}$ ,  $m = |V| = 14$ ,  $n = |E| = 17$ 。

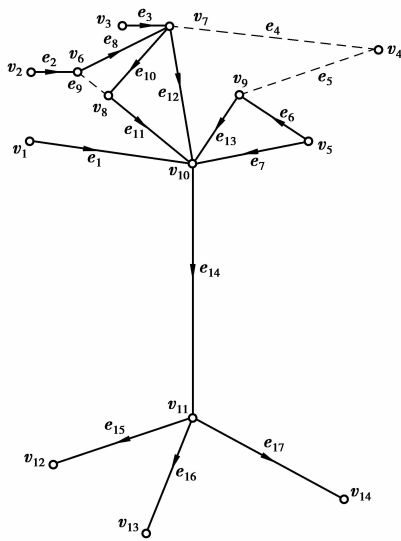


图 3 单向流体网络图

#### 3.2.1 拓扑关系分析

各支路可为双向流通, 考虑其具有对称性, 简化构成单向流通网络图(见图 3), 即村镇 1、村镇 2、村镇 3、村镇 5 为出发节点, 节点  $v_4$ 、节点  $v_{12}$ 、节点  $v_{13}$ 、节点  $v_{14}$  为目标节点。由于交叉点  $a$  与交叉点  $b$  之间的不能明确流向, 故引入一个虚节点将其连接的分支构建为单向流,  $v_6 \rightarrow v_8$  为虚分支, 时间参数为零。为了简少分析参数, 可将局域路网分为周边路网  $A$ 、周边路网  $B$  与通道 3 部分分析, 而后组合。路网构成的拓扑关系如表 1 所示。

表 1 单向流通网络拓扑关系

分支	始节点	末节点	说明
$e_1$	$v_1$	$v_{10}$	村镇 1 $\rightarrow$ 通道端点 A
$e_2$	$v_2$	$v_6$	村镇 2 $\rightarrow$ 交叉点 a
$e_3$	$v_3$	$v_7$	村镇 3 $\rightarrow$ 交叉点 b
$e_4$	$v_4$	$v_7$	交叉点 b $\rightarrow$ 村镇 4, 村镇 4 为虚节点
$e_5$	$v_4$	$v_9$	交叉点 c $\rightarrow$ 村镇 4, 村镇 4 为虚节点
$e_6$	$v_5$	$v_9$	村镇 5 $\rightarrow$ 交叉点 c
$e_7$	$v_5$	$v_{10}$	村镇 5 $\rightarrow$ 通道端点 A
$e_8$	$v_6$	$v_7$	交叉点 a $\rightarrow$ 交叉点 b
$e_9$	$v_6$	$v_8$	交叉点 a (节点 6) $\rightarrow$ 交叉点 a 交叉点 a 为虚节点
$e_{10}$	$v_7$	$v_8$	交叉点 b $\rightarrow$ 交叉点 a
$e_{11}$	$v_8$	$v_{10}$	交叉点 a $\rightarrow$ 通道端点 A
$e_{12}$	$v_7$	$v_{10}$	交叉点 b $\rightarrow$ 通道端点 A
$e_{13}$	$v_9$	$v_{10}$	交叉点 c $\rightarrow$ 通道端点 A
$e_{14}$	$v_{10}$	$v_{11}$	通道端点 A $\rightarrow$ 通道端点 B
$e_{15}$	$v_{11}$	$v_{12}$	通道端点 B $\rightarrow$ 村镇 1'
$e_{16}$	$v_{11}$	$v_{13}$	通道端点 B $\rightarrow$ 村镇 2'
$e_{17}$	$v_{11}$	$v_{14}$	通道端点 B $\rightarrow$ 村镇 3'

#### 3.2.2 邻接矩阵的建立

以 A 端周边路网的通路求解为例, 网络的源点(进入点集)  $V^- = \{v_1, v_2, v_3, v_5\}$ , 网络的汇点(离去点集)  $V^+ = \{v_4, v_{10}\}$ , 列出其无向图节点邻接矩阵  $A$  如下:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 & v_{10} \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \\ v_{10} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \underline{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{1} \\ 0 & 0 & 0 & \underline{0} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \underline{0} \\ 0 & 0 & 0 & \underline{0} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \underline{0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \underline{1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

在  $A^k$  中  $a_{1,4}, a_{1,10}, a_{2,4}, a_{2,10}, a_{3,4}, a_{3,10}, a_{5,4}, a_{5,10}$  用划线作标记, 计算  $A^2, A^3, A^4$ , 直到  $A^5 = 0$ , 将  $A^k$  中带下划线的元素求和得  $S = 11$ , 即 A 端网络通道有 11 条。S 中包括由于虚节点、虚分支的引入增

加了通道数,虚节点导入产生了回路亦增加了通道数,这些都应予以剔除。

3.2.3 通路求解及结果处理

建立节点邻接矩阵  $\mathbf{A}$  对应的  $\mathbf{A}^e, U = \mathbf{A}^e + \mathbf{I}, \mathbf{I}$  为单位矩阵,对  $U$  取行列式得  $|U|$ 。

$$\mathbf{A}^e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_6 & e_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_8 & e_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_4 & 0 & 0 & 0 & e_{10} & 0 & e_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{11} \\ 0 & 0 & 0 & e_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$|U| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & e_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & e_6 & e_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_8 & e_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_4 & 0 & 0 & 1 & e_{10} & 0 & e_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & e_{11} \\ 0 & 0 & 0 & e_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

以计算  $v_2, v_{10}$  之间的通路为例,展开行列式  $|U|$  中的  $u_{10,2}$  对应的余子式。结果为  $u_{10,2} = e_2 e_8 e_{10} e_{11} + e_2 e_8 e_{12} + e_2 e_9 e_{11}$ 。即  $v_2, v_{10}$  之间的通路之间有 3 条通路。对结果进行分析,  $e_8$  与  $v_{10}$  同时出现即形成回路,该通路应该舍弃;虚分支直接在结果中舍弃。 $v_2, v_{10}$  之间的通路数最终结果为 2 条,即  $e_2 e_8 e_{12}$  和  $e_2 e_{11}$ 。

由于  $v_4$  为工字型路网 A 端的界外节点,通过其他相邻连线到达 B 端,将其视为离去点而不予考虑。工字型路网 A 端所有进入点和离去点(只考虑通道 A 端  $v_{10}$ )之间通路如表 2 所示。

表 2 工字型路网 A 端通路表

进入点	离去点	通路
$v_1$	$v_{10}$	$e_1$
$v_2$	$v_{10}$	$e_2 e_8 e_{12}, e_2 e_{11}$
$v_3$	$v_{10}$	$e_3 e_{10} e_{11}, e_3 e_{12}$
$v_5$	$v_{10}$	$e_7, e_6 e_{13}$

最后,采用最短路径 Dijkstra 算法<sup>[21]</sup>或者其他交通流分配算法<sup>[22]</sup>,将各段分支的参数(如里程、平均行程速度等)代入各自通路,就可以比较各通路的优劣,完成灾害事件下山特征工字型路网的最佳路线诱导。

4 结 语

根据山区地形特点及山区路网特征,考虑到山区存在的关键交通设施(如桥梁、隧道、索道等)及其两端周边区域相连而成的局域路网,具有典型性和普遍性,在此提出了山区特征工字型路网的概念。为了充分发挥灾时山区路网的应急疏散效率,确定山区特征工字型路网的疏散通路,提出了山区特征工字型路网通路分析方法。通过采用时间成本分析方法,确定工字型路网通路分析的层次和边界范围,运用图论及流体网络理论,引入虚节点和虚分支进行通路矩阵分析,得出灾时山区特征工字型路网的疏散通路。计算实例及分析表明,该分析方法能很好地适应于山区特征工字型路网,解决灾时山区特征工字型路网的疏散通路问题,为山区路网应急疏散的路线诱导及应急疏散管理提供依据。

参考文献:

[1] 欧忠文,王会云,姜大立,等. 应急物流[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2004,27(3):164-167.  
OU ZHONG-WEN, WANG HUI-YUN, JIANG DA-LI, et al. Emergency logistics [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(3): 164-167.

[2] 陈岳明,萧德云. 路网应急疏散问题建模及其应用的进展[J]. 科学技术与工程,2008,8(17):4945-4950.  
CHEN YUE-MING, XIAO DE-YUN. Review of evacuation modeling in emergency and its application [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8 (17): 4945-4950.

[3] HOUSTON W. An evacuation model[R]. Washington DC: IS&EP Branch Working Paper, U. S. Nuclear regulatory Commission, 1975.

[4] VOORHEES A M. Evacuation times assessment for the diablo canyon nuclear power plant [M]. San Francisco, USA: Associates, Pacific Gas & Electric Company, 1980.

[5] SHEFFI Y, MAHAMASSANI H, POWELL W B. Evacuation studies for nuclear power plant sites: a new challenge for transportation engineering [J]. ITE Journal, 1981, 35(6): 2528-2535.

- [6] HOBEIKA A G, KIM C K. Comparison of traffic assignments in evacuation modeling [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 1998, 45 (2): 192-198.
- [7] COVA T J, JOHNSON J P. A network flow model for lane-based evacuation routing [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2003, 37 (7): 579 - 604.
- [8] STEPANOV A, SMITH J M. Multi-objective evacuation routing in transportation networks [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198 (2): 435-446.
- [9] HAMZA-LUP G L, HUA K A, PENG R. Leveraging e-transportation in real-time traffic evacuation management[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2007, 6(4): 413-424.
- [10] KALAFARAS G, PEETA S. Planning for evacuation; insights from an efficient network design model[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2009, 15 (1): 21-30.
- [11] 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 DING-WEI. Route selection model in emergency evacuation under real time effect of disaster extension[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6):1563-1566.
- [12] 张培红, 陈宝智, 卢兆明. 人员应急疏散行动开始前的决策行为[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2005, 26 (2): 179-182.  
ZHAGN PEI-HONG, CHEN BAO-ZHI, LU ZHAO-MING. Personal decision behavior before emergency evacuation[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2005, 26(2): 179-182.
- [13] 王凌东. 基于火灾安全工程理论的安全疏散分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2004, 27(12): 68-72.  
WANG LING-DONG. Analysis of safe evacuation based on engineering theory of the safety of fire disaster [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(12): 68-72.
- [14] 谢素华. 论我国公路交通应急及运输保障体系的建设 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(9): 154-158.
- XIE SU-HUA. Study on emergency response and transport organization system between China and developed countries [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (9): 154-158.
- [15] 宋永朝, 潘晓东, 陈聪, 等. 面向应急疏散的山区公路交通节点连通性研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23 (4): 102-106, 126.  
SONG YONG-CHAO, PAN XIAO-DONG, CHEN CONG, et al. Study of connectivity of traffic nodes on mountainous highway for emergency evacuation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4): 102-106.
- [16] 刘小明, 胡红. 应急交通疏散研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 108-115.  
LIU XIAO-MING, HU HONG. Research status and prospect of emergency transportation evacuation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(3): 108-115.
- [17] 裴玉龙, 杨佩昆, 杨涛. 公路网规划[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [18] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [19] 刘剑, 贾进章, 郑丹. 流体网络理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
- [20] 樊军. 灾变条件下公路重大交通基础设施运营安全对策研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [21] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematic, 1959, 1(1): 269-271.
- [22] 宋永朝, 潘晓东, 杨轸, 等. 灾害事件下局域路网应急疏散交通分配模型[J]. 公路交通科技, 2010, 27(5): 88-92.  
SONG YONG-CHAO, PAN XIAO-DONG, YANG ZHEN, et al. Traffic assignment model of emergency evacuation in local network against disaster affairs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(5): 88-92.

(编辑 陈移峰)