

# 突发灾难下大型路网中的人员疏散模型

赵 岩,高社生,姜微微

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710072)

**摘 要:**为减少突发灾难下人民生命财产的损失,研究适合中国国情的大型路网环境中人员疏散问题。在分析突发性灾难发生的类型、扩散模式及其对大型路网运输能力影响的基础上,设计了灾难对路段的影响矩阵;采用以公共交通为主,私家车辆为辅的人员疏散方案,建立由虚拟疏散起点模块、虚拟疏散终点模块、流量分配模块和疏散时间预测模块组成的大型路网人员疏散模型;并应用实际路网和模拟路网进行仿真。结果表明:设计的疏散模型能在较短时间内,得到最优疏散路线,并快速分配路段流量;针对大型复杂的路网,也能在 1 min 内设计出疏散最佳的路径,并得到各疏散节点上的实时流量;该方法可以为决策人员制定疏散计划提供依据,提高受灾人员疏散效率,减少生命财产损失。

**关键词:**交通工程;疏散模型;突发灾难;大型路网

**中图分类号:**U491.13

**文献标志码:**A

## Model of a large-scale transportation network for evacuation under emergency

ZHAO Yan, GAO She-sheng, JIANG Wei-wei

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to reduce the loss of lives and property of the people in emergency, evacuation model of large-scale transportation network which was suited to China's national conditions was studied. Firstly, the disaster influence matrix was proposed by analyzing the type and diffusion mode of emergent disasters as well as its influence on large-scale network transport capacity. Then, the evacuation plan gave first place to public transport and used private car as supplement. The evacuation model of large-scale transportation network was built, which was composed of selection module of evacuation virtual starting point, selection module of virtual evacuation destination, flow distribution module, and prediction module of evacuation time. At last, the model was applied to the actual and virtual network. The results show that this model can get the optimal evacuation route and distribute vehicle flow rapidly in a short time. For the large and complex transportation network, optimal evacuation route is worked out and real-time flow is obtained within 1 minute. The proposed model can provide a basis for decision-makers who make the evacuation plans, improve the efficiency of evacuation, and reduce the loss of lives and property. 1 tab, 5 figs, 11 refs.

**Key words:** traffic engineering; evacuation model; emergency; large-scale transportation network

## 0 引言

近几年,世界各地冰雪灾害、地震、核泄漏和恐怖主义袭击等突发性灾难接连发生,给全世界人民生命财产带来巨大损失。各国政府正在加强对突发性灾难紧急应对方案的研究。中国幅员辽阔,地质结构复杂、环境多变,地震、冰雪和泥石流等多种突发性自然灾害时有发生。为了减少人民生命财产损失,研究建立适合中国国情的突发性灾难下的大型路网人员疏散模型迫在眉睫。

国外学者对突发灾难下的人员疏散问题做了许多研究。Hediye Tüydes 针对突发灾难下的人员疏散问题,建立了动态交通分配模型(dynamic traffic assignment, DTA),采用插值的方法对疏散模型参数进行确定,由于约束条件较多,且路网中动态信息的时变性过强,导致模型参数的拟合较差<sup>[1]</sup>。Yosef Sheffi 等建立了 NETVAC 模型,利用流量守恒原理研究路网中节点流量和路段流量的基本关系,但约束条件较少,未考虑灾害对路网的影响<sup>[2]</sup>。Hubert Ludwig Klüpfel 利用元胞自动机建立行人疏散模型,研究疏散人员的微观特性,该模型为改造基础设施的布置、管理行人的疏散和分析疏散的过程起到一定的辅助作用,但该模型适用范围较窄,无法实现对大范围灾害的分析<sup>[3]</sup>。近年来,中国对突发灾难应急疏散模型的研究也取得了一定的进展,文献[4]提出基于疏散时间最短的系统优化动态交通分配模型,并进行了 7 个节点的小型路网仿真,为建立小规模疏散模型提供了思路。但文中同时指出了该算法存在的不足,有待进一步改进,以提高时效性。文献[5]指出路阻函数在交通分配过程中,对路径选择的重要性,并根据中国道路条件,拟合出路阻函数的新形式,从而克服了路段流量溢出的缺陷,使得美国路阻函数适应中国交通分配研究,为建立适合中国交通特性的疏散模型提供了保障。

从国内外研究结果看,突发灾难下亟待解决的是人员快速疏散问题,即如何使灾区群众在最短的时间内以最快的速度转移到安全地点,以减少人员伤亡和财产损失。该问题的关键,是建立科学合理的人员疏散模型。为此,本文在分析突发性灾难的类型、扩散模式和突发灾难对大型交通路网影响的基础上,研究突发灾难发生时大型路网环境下的人员疏散问题,建立适合中国国情的大型路网人员疏散模型。该模型包括虚拟疏散起点选择模块、虚拟目的地选择模块、基于路阻函数的流量分配模块和疏散时间预测模块。通过一个实际路网和一个虚拟路网的仿真,证明了所建立的模型不但能提高受灾

人员疏散效率,减少财产损失,而且能为决策人员制定疏散计划提供依据。

## 1 突发灾难

### 1.1 突发灾难的类型

公共突发灾难按其性质可分为 4 种类型和 4 个等级,4 种类型为:自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件<sup>[6]</sup>;4 个等级分别为:特别重大、重大、较大和一般。从突发灾难的分类可以看出:灾难的分类是以其发生的过程、性质和机理为依据的。按照这样的依据进行分类,可以掌握灾难发生的原因和过程,但对制定突发灾难总体应急预案缺乏理论指导依据。为了将灾难类型和疏散方案联系起来,本文提出依据灾难发生和扩散类型的可预测性分类,将其分为可预测性灾难和不可预测性灾难。

可预测性灾难有:飓风、洪水、火山喷发等,其共同特点是灾难发生时的扩散速度和对路网的影响可以提前预测。于是在进行疏散时,可以充分利用预测到的信息,合理有效地应用路网资源进行疏散。不可预测性灾难主要有地震、恐怖袭击、危险品事故和核设施事故(有些核设施事故也可划分到预测性灾难中),这些灾难往往在很短暂的时间发生,并引发次生灾难。在这类灾难中路网状况难以提前预测,只能通过事后反馈的信息,根据路网中的路段参数实时调整疏散方案。

### 1.2 突发灾难扩散模式

根据灾难扩散的空间特点可将扩散模式分为面扩散与线扩散。面扩散是指突发灾难发生后,其危害以一定的速度向四周扩散,面扩散的突发灾难有地震、恐怖袭击事件以及非典型性肺炎(SARS)等;线扩散指灾难源以一定的速度、沿一定的方向移动,所到之处对公共设施进行破坏,给人们的生命带来威胁。线扩散的突发灾难以台风、洪水为主。需要强调的是突发灾难的扩散也可能同时具备面扩散和线扩散的特征。

突发灾难的发生往往会引发次生灾难,这些次生灾难可以与突发灾难发生在同一地点或者不同地点,其影响强度有时甚至比突发灾难强烈。这些次生突发灾难还可以再次引发其他的次生灾难。如较高震级的地震常伴随暴雨,引起山区泥石流的发生。同时,由于基础设施的破坏,可能引起火灾的发生等。另外,随着突发灾难的时延,旧的数据会导致疏散方案决策人员判断失误,造成不必要的损失。因此,只对首次发生的灾难进行分析还远远不够,需要及时更新灾难数据,对路网参数进行调整,合理的调整疏散方案。

## 2 突发灾难对大型路网的影响

突发灾难对路网的影响本文主要指灾难发生后对疏散路网中路段属性的影响,一般情况下对路段起负作用。路段属性是指路段的基本属性,包括路段容量、路段流量、路段畅行速度和0流量下的路段行驶时间等。路段属性一般是恒定的。但是,当路网受到突发灾难的影响时,路段就可能受到一定程度的损坏或完全破坏。比如地震引起的山体滑坡,导致落石掩埋了部分车道或全部车道,路段流量就会受到影响,即路段流量减小或路段阻断(此时流量为0)。

因此,在建立疏散模型时必须考虑突发灾难对路网的实时影响,这样制定出的疏散计划才能符合实际情况,保证受灾人员安全快速撤离。灾难对路网的影响可以抽象为以时间为函数的影响矩阵 $\mathbf{A}$ ,表达式为

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{m \times n}, (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $m$ 为检测时间段编号; $n$ 为路网中的路段编号; $a_{ij}$ 为第 $i$ 个检测时间段内第 $j$ 条路段在灾难影响下的路段影响因子, $a_{ij} \in [0, 1]$ 。

当 $a_{ij} = 1$ 时,表示路段不受到灾难的影响,当 $a_{ij} = 0$ 时,表示路段在突发灾难影响下阻断。路网中路段影响因子 $a_{ij}$ 并非单调递减的,即路段不是只向损坏的方向发展, $a_{ij}$ 有可能通过抢修后增加,或者再次达到 $a_{ij} = 1$ 。因此影响矩阵是一个随时间变化的矩阵。

假设路段参数为 $\mathbf{C}_{1 \times n}$ (这里用路段容量表示),在第 $i$ 个检测时间段内,该路网中各路段参数 $\mathbf{C}_{1 \times n}^i$ 可表示为

$$\mathbf{C}^i = \{\mathbf{C}_j^i\}_{1 \times n}, \quad \mathbf{C}_j^i = \mathbf{C}_j^{i-1} a_{i-1,j} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{C}^i$ 为第 $i$ 个检测时间段内 $j$ 路段参数 $\mathbf{C}_j^i$ 组成的一个 $1 \times n$ 维的向量。

对于可预测性灾难而言,由于影响矩阵 $\mathbf{A}$ 可以事先估计,因此可由式(2)计算出路网中给定检测时段内各条路段的参数 $\mathbf{C}^i, i = 1, 2, \dots, m$ 。如若发生特殊情况,辅以必要参数实时反馈,以便及时更新影响矩阵,调整疏散方案。对于不可预测性灾难而言,只能通过灾难发生后的信息得到影响矩阵,再根据影响矩阵调整事先设计的疏散方案,尽可能地减小因疏散方案失误带来的损失。

## 3 突发灾难下的疏散模型

中国人口众多,紧急疏散时不宜采用以家庭为单位的疏散模式,国外的疏散模型不适合中国国

情<sup>[6]</sup>。因此,必须研究建立适合中国国情的应急疏散模型。

本文采用以公共交通为主,私家车辆为辅的突发灾难下的人员疏散方案,建立由虚拟疏散起点模块、虚拟疏散终点模块、流量分配模块和疏散时间预测模块组成的应急疏散模型<sup>[7]</sup>。

### 3.1 虚拟疏散起点模块

疏散起点是疏散行为的初始点。疏散起点的选择与突发灾难发生地点以及灾难扩散的模式密切相关,一般选择突发灾难直接影响的地区或边沿地区,也可以预先指定在特定的区域(如广场等宽阔地带)。

该模块主要考虑各个疏散起点需要疏散的人员数,疏散车辆数,并将这两组数据与对应疏散起点相结合,构建矩阵,作为整个模型的起始输入数据。

该模块能够输出疏散起始点的剩余人员占总疏散人员的比率,为决策者及时调整疏散计划提供依据。

### 3.2 虚拟疏散目的地模块

疏散目的地指疏散行为的终点,即安全集结地点。现有的目的地选择方式有以下几种。

(1)最近目的地。选择距离受灾人员最近的安全地点,所谓最近是指行驶距离最短或者预期行驶时间最短。

(2)最优目的地。疏散人员的选择根据道路系统中交通条件的变化而变化,这种目的地选择方式要以智能运输系统(ITS)为基础,并以精密的仪器为保障。

(3)指定目的地。按照长远计划向指定的目的地进行疏散,疏散方案的准确性决定了选择方式的有效性,因此制定合理有效的疏散方案尤其重要。

受灾人员在疏散前,常常选择该路网内若干个目的地。疏散是指车辆将受灾人员从危险区域运送到目的地的过程。现有的交通疏散规划大都按照地理位置或重力模型,预先为各疏散区的疏散车辆指定安全点,再根据由此形成的疏散分布OD矩阵(起讫点矩阵)进行交通流的分配(即疏散车辆的路径选择)。实际中,预先为不同的疏散起点指定特定安全点的做法限制了最优交通疏散方案的获得。由于疏散路网中交通流复杂,某些路段或交叉口可能十分拥堵。这样,一些车辆要到达预定目的地,需要等待较长的时间。反过来,如果这些车辆改变路径,选择其他目的地,反而能更快到达安全点,缩短疏散所需的时间。于是,考虑到疏散目的地选择与疏散路径选择的密切联系,一些学者提出了基于单安全点的路网模型,采用对疏散交通分布和疏散路径进行同

步优化的方法,提出单 OD 路径模型,该模型在已知疏散位置、疏散需求和疏散安全点的情况下,通过在路网模型中设定虚拟危险点和安全点,分别与各自疏散起点和疏散安全点相连,把原疏散路网上的交通由多疏散起点、目的地问题转化成单疏散起点、目的地问题,即单 OD 路径问题<sup>[8]</sup>,如图 1 所示。

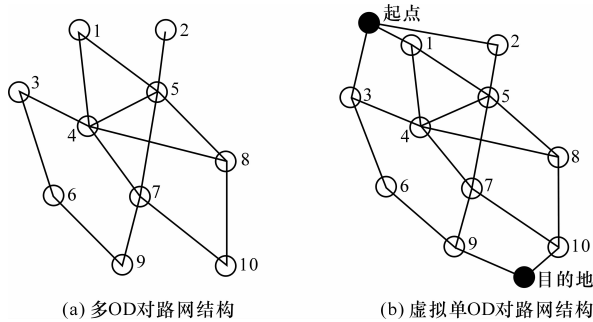


图 1 多 OD 路网向单 OD 路网的转化

Fig. 1 Transformation of multiple OD network to single OD network

图 1(a)表示一个三起点(起点 1、起点 2 和起点 3)两终点(终点 9 和终点 10)的简单路网,通过设置虚拟的疏散起点和疏散终点实现对路网的转化。如图 1(b)所示,将图 1(a)变成了一个单起点单终点的路网结构。

### 3.3 流量分配模块

Wardrop J G 提出的出行路径选择第一原理和第二原理如下所述<sup>[9]</sup>。

第一原理:路网上的交通需求以这样一种方式分配,就是任一 OD 对间所有使用者出行费用都相等,且比未使用的路径成本小。

第二原理:路网上的交通分配,使得路网上所有出行的总成本最小。

Wardrop J G 第一原理描述了人们出行的一般规律,满足这一原理的平衡状态为用户最优平衡,简称 UE(User Equilibrium)。满足 Wardrop J G 第二原理的平衡状态称为系统最优平衡,简称 SO(System Optimum)。

交通分配就是将 OD 矩阵中交通需求量分配到路网中,形成路段流量,这种分配应该按照 Wardrop 的 UE 原理。可以证明,符合 UE 原理的流量分配可以从求解下列数学规划问题中得到。

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_j(w) dw \quad (3)$$

约束条件

$$\sum_{k \in P_{rs}} f_{rs}^k = q_{rs}, r \in R, s \in S \quad (4)$$

$$f_{rs}^k \geq 0, r \in R, s \in S, k \in P \quad (5)$$

$$x_j^i = x_j^{i-1} + \left( \sum_{l \in \Gamma^{-1}(j)} y_{lj}^{i-1} - \sum_{l \in \Gamma(j)} y_{jl}^{i-1} \right) \quad (6)$$

$$y_{jm}^i = \min \{ x_j^i, \min [Q_j^i, Q_m^i], \psi_m^i (Q_m^i - x_m^i) \} \quad (7)$$

其中路段流量为

$$x_j = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in P} f_{rs}^k \delta_{rs}^{ak}, j \in A \quad (8)$$

式中: $Z(x)$ 为疏散的时间成本; $t_j$ 为行驶路段 $j$ 所需的平均时间; $R$ 为所有驶入路段节点的集合; $S$ 为所有驶出路段节点的集合; $r$ 为驶入路段的节点; $s$ 为驶出路段的节点; $f_{rs}^k$ 为 OD 对 $(r, s)$ 之间的路径 $k$ 上的流量; $q_{rs}$ 为单位时间段内从 $r$ 到 $s$ 的交通需求量; $P$ 为所有路径的集合; $k$ 为路径; $A$ 为所有路段的集合; $j$ 为路段; $x_j$ 为路段 $j$ 上的交通流量; $\delta_{rs}^{ak}$ 路段因子, {1, 若路段 $j$ 在 $(r, s)$ 之间的路径 $k$ 上; 否则为 0};  $\Gamma^{-1}(j)$ 、 $\Gamma(j)$ 分别为路段出口与路段 $j$ 入口相连接的路段集合和路段 $j$ 出口与路段入口相连接的路段集合; $y_{jm}^i$ 为时段 $i$ 内从路段 $j$ 流入路段 $m$ 的车辆数; $\psi_m^i$ 为分流系数; $Q_j$ 为路段 $j$ 上的最大容量。

式(6)为路段 $j$ 上流量 $x_j^i$ 是前一时刻仍在路段中的流量 $x_j^{i-1}$ 与流入路段流量 $\sum_{l \in \Gamma^{-1}(j)} y_{lj}^{i-1}$ 和流出路段流量 $\sum_{l \in \Gamma(j)} y_{jl}^{i-1}$ 之差的和。

式(7)中 $y_{jm}^i$ 由 3 部分构成:①前一路段剩余的流量;②相邻路段最大流量的最小值;③可向下一路段的分配流量,显然这三部分最小量就是路段可以输出的流量。

一般采用美国路阻函数(U. S. Bureau of Public Roads Function, BPR)直接计算 $t_j(w)$ 。BPR 的表达式为

$$t_j(w) = t_{j0} [1 + \alpha (x_j / Q_j)^\beta] \quad (9)$$

式中: $t_j(w)$ 为路段阻抗(车辆通过路段 $j$ 的行驶时间); $t_{j0}$ 为车辆在 0 流量时通过路段 $j$ 的时间; $\alpha, \beta$ 均为路阻系数,一般为常量,取 $\alpha=0.5668, \beta=1.4431$ <sup>[5]</sup>。

通过定义一个 Lagrange 函数,很容易证明式(3)~式(8)的解满足 Wardrop 的 UE 条件<sup>[10]</sup>。且式(3)~式(8)是凸规划问题,必定有满足 UE 条件的唯一路段流量解<sup>[11]</sup>。

用凸组合算法求解式(3)~式(8)的具体步骤如下所示。

Step1:初始化。令路段时间为 $t_j = t_j(0), j \in A$ ,在此基础上执行全有全无分配,产生路段流量 $x^1$ ,置迭代计数为 $n=1$ 。

Step2:更新突发灾难对路段影响后的路段行驶时间 $t_j^n = A \times t_j(x_j^n), j \in A$ 。

Step3:寻找下降方向。在 $t_j^n$ 的基础上寻找最短路径并进行全有全无分配,产生增广路段流量 $y^n$ 。

Step4:确定最优迭代步长  $a^n$ ,即求解式(10)所描述的一维优化问题。

$$\min Z(x) = \sum_{j \in A} \int_0^{x_j + a(y_j^n - x_j^n)} t_j(w) dw$$

$0 \leq a \leq 1$

(10)

Step5:更新路段流量  $x_j^{n+1} = x_j^n + a^n (y_j^n - x_j^n), j \in A$ 。

Step6:如果达到收敛标准则停止迭代,解为  $x^{n+1}$ ,否则令  $n = n + 1$ ,转到 Step2。

上面的迭代过程中只需要保留路段流量,不需要保留路径流量。根据流量分配结果,很容易将车流量安排到对应的路段上去,以便实现疏散车辆的路径选择。

3.4 疏散时间预测模块

由式(2)可知,车辆在路段行驶的时间与  $t_{j0}$ 、 $Q_j$  和  $x_j$  有关,一旦道路选定,  $t_{j0}$  与  $Q_j$  随之确定,相应地  $x_j$  与  $w_j(w)$  也就唯一确定。疏散预测时间  $T$  为

$$T = (2I - 1) \sum_{i=1}^I \max_{k \in P} (\sum_{a \in k} t_j^i(x_j^i))$$

(11)

表 1 节点位置坐标

m

Tab. 1 Node coordinates

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x 坐标	961 411	937 999	958 357	968 536	977 697	987 367	1 006 198	1 007 216	990 930
y 坐标	4 434 057	4 408 100	4 409 627	4 413 699	4 416 752	4 430 189	4 413 393	4 391 509	4 385 910

节点号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
x 坐标	957 339	934 436	920 186	965 482	994 492	1 010 270	1 013 832	1 022 993	1 035 717
y 坐标	4 381 126	4 384 383	4 355 679	4 347 535	4 350 080	4 356 391	4 379 090	4 381 126	4 358 223

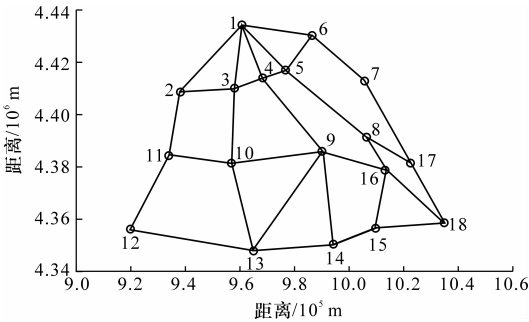


图 2 路网结构 I

Fig. 2 Transportation network structure type I

当该路网受到可预测性突发灾难影响时,事先输入影响矩阵,并假设路网中的车辆以相同的速度疏散,用 Matlab 进行仿真,得到的疏散起点的交通量与疏散时间的函数关系,如图 3 所示。

图 3 中星划线、点划线和圈划线分别表示疏散起点 1、2、6 在疏散过程中剩余人员需要分配的车辆数,当车辆数为 0 时表示人员全部离开事故点。从图 3 可以看出,疏散起点 2 车辆首先疏散完毕,疏散起点 6 次之,疏散起点 1 最后疏散完毕。其原因有 2 个:①疏散起点 2 和 6 需要疏散的人员数比疏散

式中:  $T$  为预测的疏散时间;  $I$  为车队往返运输的总次数。

式(11)表示在每次运输过程中,选择通过路径消耗最长的时间作为一次疏散的基准时间,再乘以往返的次数,得到疏散的预测时间。值得注意的是,这个预测时间比实际疏散时间略长,决策者在这样的预测时间里制定出的疏散计划,可以使疏散人员的恐惧感降低,从而减小因个人行为对疏散方案的影响。

4 模型仿真

4.1 仿真算例一

从地理信息系统(Geographic Information System, GIS)中提取出北京到天津的路网结构图,共有 18 个节点,将节点 1、2、6 定义为疏散起点,预疏散车辆数分别为 9 800 辆次、8 000 辆次和 8 000 辆次,并设节点 1 为虚拟疏散起点。节点 12、18 定义为疏散目的地。路网结构如图 2 所示,各点地理位置坐标如表 1 所示。

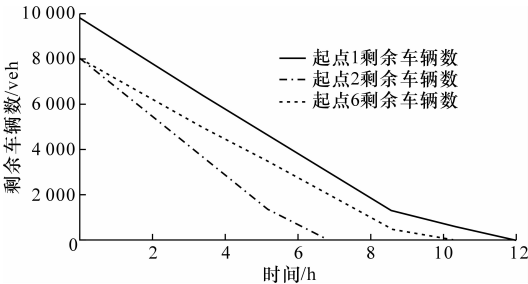


图 3 疏散起点剩余交通量与时间函数关系

Fig. 3 Relationship between residual traffic in evacuation origin and time

起点 1 的人员少;②由图 2 可知,疏散起点 2 距离疏散终点最近,疏散起点 6 次之,疏散起点 1 离疏散终点最远。因此,疏散起点 6 完成疏散任务所需的时间最长,仿真结果与实际情况相符。

4.2 仿真算例二

由模拟试验生成一个有 26 个节点的路网图。将节点起点 1、起点 2、起点 3、起点 4、起点 5 定义为疏散起始点,预疏散车辆数分别为 6 500 辆次、6 000 辆次、5 500 辆次、5 000 辆次和 4 500 辆次,将 2 个节点定义为疏散目的地。路网结构如下页图 4 所示。

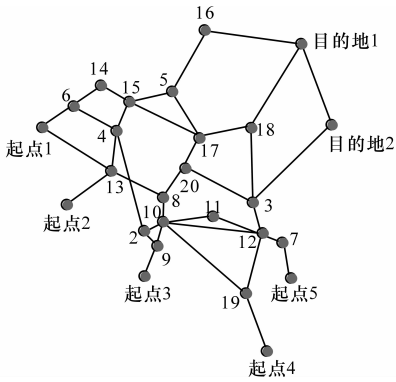


图4 路网结构 II

Fig. 4 Transportation network structure type II

将路网结构图加载到疏散模型中,得到疏散起点剩余交通量与时间的关系,如图 5 所示。针对大型复杂的路网,仿真时间也能在 1 min 内设计出疏散最佳的路径,并得到各疏散节点上的实时流量,克服了一般模型时效性差的缺陷。

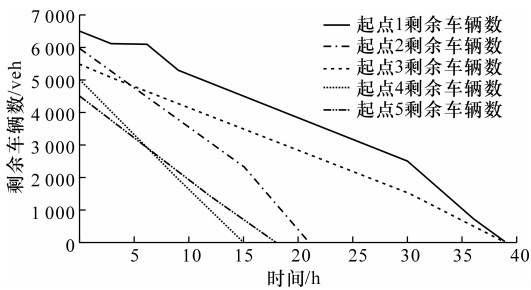


图5 疏散起点剩余交通量与时间函数关系

Fig. 5 Relationship between residual traffic in evacuation origin and time

## 5 结 语

(1)在分析突发性灾难发生的类型、扩散模式及其对大型路网运输能力影响的基础上,设计灾难对路段的影响矩阵。

(2)根据 Wardrop 原则建立适合中国国情的大型路网人员疏散模型,即采用以公共交通为主,私家车辆为辅的人员疏散方案,建立由虚拟疏散起点模块、虚拟疏散终点模块、流量分配模块和疏散时间预测模块组成的大型路网人员疏散模型。

(3)应用实际路网和模拟路网进行仿真,得到最优疏散路线并快速分配路段流量,即使是大型复杂的路网,也能在 1 min 内设计出疏散最佳的路径,并得到各疏散节点上的实时流量。本文所做的研究工作,不但能提高灾难发生条件下受灾人员的疏散效率,减少财产损失,而且对决策人员制定疏散计划有重要的参考价值和帮助作用。

## 参考文献:

### References:

- [1] Hediye T. Network traffic management under disaster conditions[D]. Evanston:Northwestern University,2005.
- [2] Yosef S, Hani M, Warren B P. A transportation network evacuation model[J]. Transportation Research, 1982,16A(3):209-218.
- [3] Hubert L K. A cellular automaton model for crowd movement and egress simulation[D]. Duisbrgg: University of Duisburg-Essen,2003.
- [4] 陈岳明,肖德云. 基于动态交通分配的路网应急疏散模型[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(8):1102-1105.  
CHEN Yue-ming, XIAO De-yun. Dynamic traffic assignment-based method for real-time traffic management during emergency evacuation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(8):1102-1105. (in Chinese)
- [5] 王树盛,黄卫,陆振波. 路阻函数关系式推导及其拟合分析研究[J]. 公路交通科技,2006,23(4):107-110.  
WANG Shu-sheng, HUANG Wei, LU Zhen-bo. Deduction of link performance function and its regression analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4):107-110. (in Chinese)
- [6] Pamela M M T. Identification of vulnerable transportation infrastructure and household decision making under emergency evacuation conditions [D]. Richardson: The University of Texas,2003.
- [7] 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(6):108-115,121.  
LIU Xiao-ming, HU Hong. Research status and prospect of emergency transportation evacuation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6):108-115,121. (in Chinese)
- [8] 朱耀昆,汪卓. 基于单安全点路网模型的区域交通疏散研究[J]. 现代交通技术,2009,6(5):58-61,86.  
ZHU Yao-kun, WANG Zhuo. Regional traffic evacuation research based on one-destination network model [J]. Modern Transportation Technology, 2009, 6(5):58-61,86. (in Chinese)
- [9] Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research[J]. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1952,1(2):325-378.
- [10] Hediye T. Network traffic management under disaster conditions[D]. Evanston:Northwestern University,2005.
- [11] Sheffi Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods [M]. New Jersey:Prentice-Hall,Englewood Cliffs,1985.