

大型活动应急疏散交通需求时间加载模型

任 刚¹, 赵 星¹, 贺康康², 李慧颖¹

(1. 东南大学 交通学院, 南京 210096; 2. 宁波工程学院 交通学院, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 由于大型活动应急疏散交通需求有明显的时变性特点, 需要对应急交通需求分布的时间维度精确刻画, 详细分析了场所内部疏散人员进入路网各个阶段的时间分布和场所外部人员疏散时间影响因素, 给出了改进的应急交通需求时变曲线函数. 以南京奥体中心体育场蔡依林演唱会为例, 虚拟大规模爆炸威胁事件, 对体育场及其周边区域进行紧急疏散. 通过 TransCAD 仿真分析, 预测得到疏散总量、不同交通方式比例和疏散行为反应曲线.

关键词: 大型活动; 应急疏散; 交通需求; 时间加载模型

中图分类号: U 491.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)11-1618-06

Time-loading Model of Evacuation Traffic Demand for Large-scale Activities

REN Gang¹, ZHAO Xing¹, HE Kang-kang², LI Hui-ying¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Transportation, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Traffic demand of emergency evacuation during large-scale activities appears obvious time-varying characteristic, thus time dimension of evacuation traffic demand distribution needs to be described precisely. This paper analyzes the staged time distribution of evacuation populations in stadium entering into the network, presents the influence factors to evacuation time of population outside the stadium, and provides an improved time-varying curve function of evacuation traffic demand. Take the concert of Jolin at Nanjing Olympic sports center stadium as an example, suppose that a virtual bomb threat event happens, population in and around the stadium need to be evacuated. Through simulation and analysis by TransCAD, evacuation demand, proportion of different modes of transportation and response curve of evacuation behavior can be forecasted and acquired.

Key words: large-scale activities; emergency evacuation; traffic demand; time-loading model

大型活动举办期间突发事件下的应急疏散交通需求具有明显的时变特点, 疏散人群波浪性涌入路网, 在不同时间、不同路段和交叉口上形成短时高峰流. 当突发事件的影响范围较大、需要疏散的居民较多时, 会考虑采取分阶段疏散策略——将疏散区按照风险高低或灾害到来的时间划分成具有不同紧急级别的疏散区域并分别在不同的时间开始撤离,

以此避免同时撤离可能造成的交通拥堵现象. 因此, 应急疏散交通需求预测结果对时间维度的精度要求较高, 很多学者着重关注疏散交通需求离开集结点加载至路网的时间问题, 即确定不同时间段疏散交通需求量按某一百分比逐步加载到路网中. 目前, 对于应急疏散需求时间加载模型主要为 S 型行为反应曲线(S-Curves)^[1-2]. 该模型已广泛应用于

收稿日期: 2012-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078086).

作者简介: 任刚(1976—), 男, 教授, 主要从事交通规划、交通安全、应急交通疏散等方面的研究. E-mail: rengang@seu.edu.cn.

飓风、地震等突发事件的疏散研究,也集成在多种应急交通疏散软件包中. 美国陆军工程师团依据反应时间的快慢,给出了快速、中速和慢速的 3 种行为反应曲线,同时发现约为 10% 的疏散人群会在疏散开始之前自行疏散^[3]. Tuydes^[4]开展了与分阶段疏散优化设计相关的研究,提出了一个混合线性整数规划模型,同步优化终点/路径选择和分阶段疏散策略. Chen 等^[5-6]对棋盘状、环状和真实路网在紧急情况下的分批疏散和同时疏散进行了基于仿真的对比分析. 李蜜^[7]按类型分析法引入当量车辆的概念,结合路网情况和时间因素改进了应急交通需求时间加载模型. 但上述模型并没有考虑场所内外疏散人员疏散时间分布的差异,也缺乏对疏散各个阶段的详细分析,为此本文考虑不同疏散人员的疏散特性,并将突发事件发生到疏散车辆驶出停车场整个过程细分为若干个阶段,详细刻画各阶段的时间分布,提出改进的时间加载模型.

1 建模思路

大型活动应急疏散交通需求时间加载建模的核心问题是计算各阶段疏散的起始时间,一旦另行确定了各阶段疏散的比例,就能在不同时间段将疏散交通需求量按一定的百分比逐步加载到路网中. 当突发事件影响范围较广的时候,不仅大型活动场馆内的观众和工作人员需要疏散,场馆外部分地区的居民同样要在第一时间撤离. 由于场馆内部疏散在信息发布、疏散组织等方面都比外部疏散具有优势,因此这 2 部分交通需求在疏散时间上存在较大差异,需要分类计算. 某个时段加载到路网中的累计交通量由场所内部和场所外部累计疏散的人数相加得到:

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q_n(t) + Q_w(t) = \\ &A_n \times P_n(t) + A_w \times P_w(t) = \\ &A_n \times \int_0^t y_n(t) dt + A_w \times \int_0^t y_w(t) dt \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $Q_n(t)$ 、 $Q_w(t)$ 分别为场所内部、外部累计疏散的人数; A_n 、 A_w 分别为场所内部、外部所需疏散的总人数; $P_n(t)$ 、 $P_w(t)$ 分别为场所内部、外部时间分布概率函数,即 t 时刻的疏散累积比率; $y_n(t)$ 、 $y_w(t)$ 分别为场所内部、外部时间分布概率密度函数,即 t 时刻的疏散比率.

2 场所内部观众应急疏散起始时间计算

2.1 计算过程概述

一般情况下,场所内部观众应急疏散交通流主

要由 VIP 车辆、观众车辆、工作人员车辆、救援车辆等组成. 疏散人群从突发事件发生到进入路网通常分为 6 个阶段:

- 1) 从突发事件发生到疏散命令下达阶段 t_1 , 需要的时间与大型活动应急反应机制和信息发布能力相关;
- 2) 疏散人员反应阶段 t_2 , 需要的时间与人们的反应速率相关;
- 3) 从场馆步行到停车场(或是临时驻车点、公交站台)阶段 t_3 , 需要的时间与人群的步行速度和场馆到停车场的距离相关;
- 4) 疏散人员等候救援车辆阶段 t_4 , 需要的时间与疏散人员达到上车点和救援车辆达到场所的时间相关. 对于自行疏散的人员来说 $t_4 = 0$;
- 5) 疏散人员上车阶段 t_5 , 需要的时间主要与上车人数相关;
- 6) 车辆驶出停车场阶段 t_6 , 需要的时间与停车场到路网的距离和停车场驶出线路的拥挤程度相关.

车辆驶出停车场的分布也是场所内部观众最终疏散起始时间分布. 大型活动应急疏散时人群一般步行到若干停车场或者临时驻车点,每个停车场或者临时驻车点的距离、容量、疏散能力等基本情况都不相同,因此人群到达的数量和车辆离开的时间分布也不相同. 多个停车场的总的时间分布概率密度函数 $y_{\text{内}}(t)$ 可通过下式计算得到

$$y_{\text{内}}(t) = \sum_{i=1}^n w_i \times g_i(t) \quad (2)$$

式中: w_i 为停车场 i 的权重; $w_i =$ 停车场的容量/所有停车场疏散总量; $g_i(t)$ 为车辆离开停车场 i 的时间分布概率密度函数.

2.2 命令下达和反应阶段

根据城市的不同和发生的突发事件的不同,这 2 个阶段所需要的时间相差较大. 可以根据以往发生的突发事件所需启动时间的历史调查数据来确定该值. 本文认为这 2 阶段的时间对于场所内所有疏散人员来讲都是相同的,因此不会对疏散起始时间分布产生影响.

2.3 步行阶段

从有关行人的调查结果看,步行速度符合正态分布^[8],即 $V \sim N(\mu, \sigma)$, $\Phi(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}}$. 根

据研究^[9],一般取 $\sigma = 35$ $\mu = 70$,这 2 个参数也可以通过实际调查得到.

设停车场到活动场馆的距离为 L ,只有当疏散

人群的步行速度 V 满足 $v \geq \frac{L}{T}$ (即 $t \leq T$) 时,才能在 T 时间内到达停车场. 因此步行时间 t_3 的概率分布函数 $F(T)$ 可由

$$F(T) = P(t \leq T) = P\left(v \geq \frac{L}{T}\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\frac{L}{T}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3)$$

得到.

根据正态分布特性以及分布函数与密度函数的关系,可得步行时间 t_3 的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{d[F(T)]}{dt} = \frac{d\left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\frac{L}{T}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx\right]}{dt} = \frac{L}{\sqrt{2\pi}\sigma t^2} e^{-\frac{(\frac{L}{T}-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

为方便后续对疏散过程研究,可将连续的步行时间概率密度函数离散化,得到每一时段(如 3 min 或 5 min) 活动参加者到达停车场的概率. 设 $F(T_1)$ 为 T_1 时刻到达的概率, $F(T_2)$ 为 T_2 时刻到达的概率. 则 T_1 到 T_2 这段时间到达的概率为 $F(T_2 - T_1)$.

$$F(T_2) = \int_{T_1}^{T_2} f(t) dt = \int_{T_1}^{T_2} \frac{L}{\sqrt{2\pi}\sigma t^2} e^{-\frac{(\frac{L}{T}-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (5)$$

2.4 上车阶段

上车阶段的时间为疏散人员到达停车场或者临时驻车点,依次上车至满员所需时间. 根据调查分析,这个阶段每个人花费的时间差别不大,一般在 2 s 左右. 可认为这个过程对于场所内所有疏散人员而言所花费的时间都是相同的,因此时间分布曲线不变,只是滞后了这个阶段所花费的时间. 经过这一阶段后,人的出行时间分布转化为车的时间分布.

2.5 驶出阶段

研究根据停车场地出口通行能力的不同分为 2 种情况: 标准停车场(即出口通行能力有限,一般出口为单车道)和路边停车点或者临时驻车点(即出口通行能力不限制).

2.5.1 标准停车场

标准停车场的车辆离开以出入口通行能力为极限. 如图 1 所示,当疏散车辆在 t_a 时刻开始离开停车场时,疏散的人群为步行速度较快的人群,车流行驶状态为自由流. 随后,车流行驶状态迅速地变为

拥挤流直至饱和流,并长时间保持在饱和流的状态. 当疏散进行到尾声,即 t_c 时,车流行驶状态又由饱和流逐步转变成自由流,直至消失.

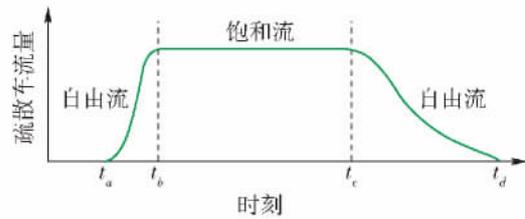


图 1 车辆离开停车场的时分分布

Fig. 1 Time distribution of vehicles leave from parking lots

由大型活动应急疏散的特性可知,应急疏散时标准停车场的车流行驶状态长时间处于饱和流状态,自由流和拥挤流的存在时间相对可以忽略. 当出口单车道的最大车流量在 800 以上,车辆行驶分布是定长分布^[9]. 时间分布概率密度函数即为停车场出口所有出口单位时间的总通行能力.

$$S = \sum_j S_j = \sum_j \sum_i \frac{3600}{h_i} \alpha_{ij} \beta_i \quad (6)$$

式中: S 为 1 个停车场出口总的通行能力 (pcu/h); S_j 为停车场第 j 个出口单车道的通行能力 (pcu/h); α_{ij} 为停车场第 j 个出口单车道第 i 种车型比例; β_i 为第 i 种车型的当量小汽车转换系数; h_i 为第 i 种车型的安全时距.

2.5.2 路边停车点

当人群到达停车场时救援车辆已经到达,则人群离开停车场的时分分布就与到达的时分分布一致;当人群到达停车场时救援车辆还未到达,则人群离开停车场的时分分布主要与救援车辆的到达分布相关. 救援车辆的到达分布影响因素较多,没有一般化的规律,本文不予讨论. 在救援车辆已经到达情况下,车辆离开停车场的概率密度函数

$$g(t) = f(t - t_1 - t_2 - t_4) = \frac{L}{\sqrt{2\pi}\sigma(t - t_1 - t_2 - t_4)} e^{-\frac{[\frac{L}{(t-t_1-t_2-t_4)}-\mu]^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

3 场所外部居民应急疏散起始时间

在已有研究基础上,本文提出以下改进公式,以估算应急交通需求量加载到路网中的累计百分比.

$$P(k) = \begin{cases} \frac{1}{1+\delta}, & k=0 \\ \frac{1}{1+\exp[-\alpha(k\Delta t - H)]}, & k\Delta t \in (0, T) \\ 1, & k\Delta t = T \end{cases}$$

式中: $P(k)$ 为时间段 k 交通生成的累计百分比; Δt 为每个时间段的时间间隔,可根据计算精度需求进行设定; T 为整个应急疏散过程所需时间; k 为整个应急交通疏散过程中具体时间段 $k=1, 2, 3, \dots, n$, 且 $n\Delta t = T$; δ 为 $\delta = \exp(-\alpha H)$, 当 $t = 0$ 时, $\delta = \frac{1 - P(0)}{P(0)}$, 表示在疏散命令下达时刻已疏散需求量与尚未疏散需求量的比例,这个比例可以根据历史调查的数据进行标定,参考值 $\delta = 9$.

可以推导出某一时间段 k 的疏散百分比为

$$p(k) = P(k) - P(k-1) \quad k \in (0, n)$$

4 仿真分析

4.1 案例背景

南京奥体中心位于南京河西新城区中心区域,

主要包括主体育场、体育馆、游泳馆、网球中心和新闻中心五大场馆,是为支持 2005 年南京全运会而构建。奥体中心所在的河西新城区是南京新兴发展地区,目前土地开发利用率较低,交通吸引发生量较小,常态下主要为过境交通流。在大型活动应急疏散时,对附近路口实行禁行等交通管制手段可以有效减少常规交通量,消除背景交通对疏散的影响。

本文以 2011-09-17 在中心体育场举办的蔡依林 Myself 世界巡回南京站演唱会为例。假设奥体中心有大规模爆炸威胁作为突发事件,需要迅速疏散活动参与人员以及周边 1 km 区域的人群至预定各个避难所或者交通枢纽,并且要求在 40 min 内疏散完毕。突发事件影响的区域及各避难所和交通枢纽如图 2 所示。



图 2 大型活动突发事件影响区域和避难所示意图

Fig. 2 Affecting areas of large-scale activity and shelters

4.2 仿真方法与数据

本文选用 TransCAD 作为应急疏散仿真平台,并辅之以上文研究得到的模型。以南京奥体中心周边半径 4 km 范围内的路网为研究对象,参照通过交通调查得到的实地勘测数据,并通过 Google Earth 等多种地图数据校核,建立仿真基础路网,如图 3 所示。综合考虑地理位置、突发事件影响以及交通分析的需要,将整个区域划分为图 4 所示 12 个交通小区。

演唱会有将近 12 000 观众,60 名 VIP 人员(包括记者、演唱会嘉宾和赞助商)以及 200 名左右的演唱会表演人员和工作人员,奥体中心本身拥有 200 名左右工作人员。结合河西新城区人口、土地利用、机动车等相关调查统计资料,采用已有文献中的

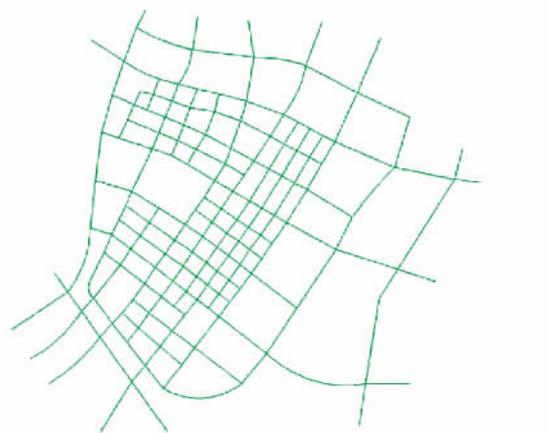
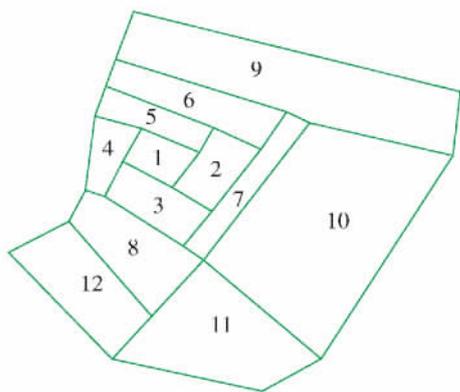


图 3 TransCAD 基础路网

Fig. 3 Basic road network



突发事件影响区	范围(小区编号)
危险区	1、2、3、4、5
缓冲区	6、7、8
安全区	9、10、11、12

图4 交通小区划分图

Fig.4 Traffic zone division

大型活动应急疏散交通需求预测方法^[10],分析得到疏散交通需求总量、分布和方式,交通小区 OD 期望线,如图5所示.

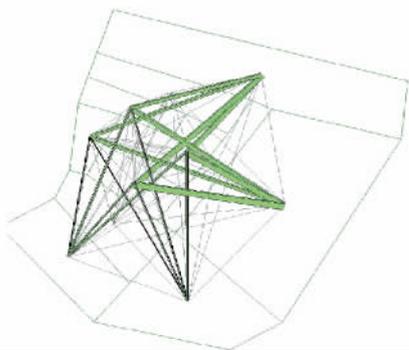


图5 交通小区 OD 期望线

Fig.5 OD expection line of traffic zone

4.3 仿真结果

根据南京的大型活动应急机制和观众反应时间,预计观众在发现爆炸威胁 5 min 后开始疏散.根据式(6)(7)得到不同方式时间分布函数.步行、非机动车、公交车、出租车以及救援车辆疏散的时间分布

$$g(t) = f(t - 300) = \frac{L}{87(t - 300)^2} e^{-\left[\frac{t}{2.450} - 70\right]^2}$$

由停车场疏散的私家车时间分布

$$g(t) = f(t - 300) = 1.4$$

场馆以外区域应急疏散交通量的时间加载函数

$$P(k) = \begin{cases} 0.1, & k = 0 \\ \frac{1}{1 + \exp[-0.11(5k - 20)]}, & k \in (0, 8) \\ 1, & k = 8 \end{cases}$$

描绘得到场所内外疏散行为反应曲线,见图6.

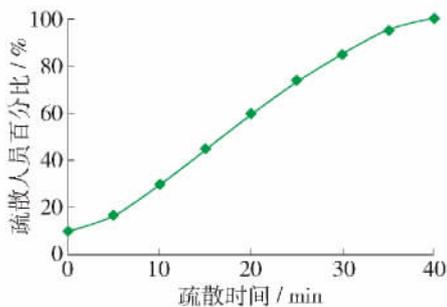


图6 疏散行为反应曲线

Fig.6 Response curve of evacuation behavior

结合场所内部和场所外部的时间分布曲线,最终得到大型活动应急疏散时间加载函数.结合疏散时间分布曲线,每次加载 10 min 的交通量,通过 TransCAD 中的随机用户均衡分配模型,得到最后的分配结果,如图7所示.

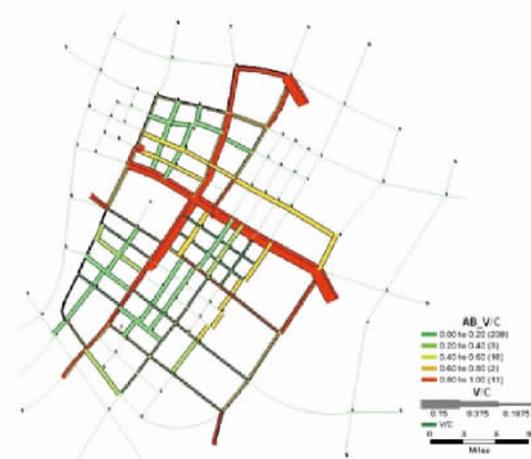


图7 应急疏散交通分配结果

Fig.7 Traffic distribution result of evacuation

根据 TransCAD 的分配结果可以看到,城市应急疏散量主要集中在梦都大道和江东中路这 2 条主干道上,整条道路疏散方向上的平均饱和度在 0.7 ~ 0.9. 其他路段的饱和度均在 0.5 以下,总的来说,整个路网的交通压力不大,疏散车辆可以安全、快速地离开危险区.

5 结论

1) 详细分析了场所内部疏散人员进入路网各个步骤和场所外部人员疏散时间影响因素,提出了改进的应急交通需求时变曲线函数.

2) 通过对场所内部疏散人员从突发事件发生到疏散命令下达、疏散反应、从场馆步行到停车场

(或是临时驻车点、公交站台)、等候救援车辆、上车及车辆驶出停车场 6 个阶段时间分布的研究和场所外部人员时间加载函数的改进,精确刻画出不同应急交通需求离开集结点进入路网的时间,以便实时分配事故点与避难地点之间交通流量,及时调整交通组织措施,达到最大程度地提高疏散效率、降低疏散时间的目标。

3) 本文所提出的模型及方法缺乏对疏散人员心理特征、个体特性等微观因素的考虑,今后可以针对疏散人员的心理特性和应急车辆跟驰特性等因素进一步研究。

参考文献:

- [1] JAMEI B. Transportation actions to reduce highway evacuation times under natural disasters [R]. VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984.
- [2] TWEEDIE S, ROWLAND J, Walsh S, et al. A methodology for estimating emergency evacuation times [J]. The Social Science Journal, 1986, 23(2): 189-204.
- [3] US Army Corps of Engineers. Alabama hurricane evacuation study technical data report: behavioral analysis [R]. Washington, D. C.: Department of the Army, 2000.
- [4] TUYDES H. Network traffic management under disaster conditions [D]. Chicago: Technological Institute, Northwestern University, 2005.
- [5] CHEN X W, ZHAN F B. Agent-based modelling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies [J]. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59(1): 25-33.
- [6] CHEN X W. Agent-based micro-simulation of staged evacuations [J]. International Journal of Advanced Intelligence Paradigms, 2012, 4(1): 22-35.
- [7] 李蜜. 不可预警突发事件下城市应急交通需求预测及分配[J]. 中国公共安全: 学术版, 2010(3): 80-83.
LI Mi. Urban transportation demands prediction and distributions in sudden unexpected public emergencies [J]. China Public Security: Academy Edition, 2010(3): 80-83. (in Chinese)
- [8] NAGATANI T. Dynamical transition in merging pedestrian flow without bottleneck [J]. Physical A, 2002, 307(3): 505-515.
- [9] 崔洪军. 大型活动交通组织管理关键技术研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2006.
CUI Hong-jun. Study on the key technology of traffic management under large special events [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [10] 陈峻, 王伟. 城市路外停车场出入口交通组织分析 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(1): 100-103.
CHEN Jun, WANG Wei. Traffic organization analysis on entrance and exit of off-road parking lot [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(1): 100-103. (in Chinese)
- [11] 贺康康. 大型活动应急疏散交通需求预测模型研究 [D]. 南京: 东南大学交通学院, 2012.
HE Kang-kang. Study on large-scale activities emergency evacuation traffic demand forecast model [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2012. (in Chinese)

(责任编辑 张 蕾)