

文章编号:1671-8879(2015)02-0132-06

# 基于元胞自动机模型的应急车辆行程时间

赵韩涛,马国胜,毛宏燕

(哈尔滨工业大学 汽车工程学院,山东 威海 264209)

**摘 要:**针对应急车辆通行时交通流参数难以实时获取的问题,提出以仿真手段模拟交通运行,进而探讨随机交通条件下应急车辆行程时间的计算。在分析有应急车辆的混合交通流运行特性的基础上,增加车辆类型,引入应急车辆影响区域和普通车辆让行概率 2 个参数,修改车辆换道与速度更新规则,建立了双车道交通流元胞自动机模型。利用 MATLAB 进行数值模拟,生成不同交通密度条件下的应急车辆行程时间,并与现有计算公式进行对比分析。研究结果表明:应急车辆仅干扰其所处位置的车流运行,对双车道总体流量没有影响,在密度位于 0.12~0.36 范围内优先通行效果较好;在密度较小( $\leq 0.08$ )或较大( $\geq 0.24$ )时,应急车辆行程时间随着行驶距离的增加呈现近似正比例的增加,且密度越大,增长的斜率越大。研究发现现有针对应急车辆的距离-行程时间函数适用于低密度及高密度交通条件,而在 0.12~0.20 密度范围内失去效用。

**关键词:**交通工程;交通流;元胞自动机;应急车辆;行程时间

**中图分类号:**U491

**文献标志码:**A

## Emergency vehicle travel time based on cellular automaton model

ZHAO Han-tao, MA Guo-sheng, MAO Hong-yan

(School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, Shandong, China)

**Abstract:** To determine emergency vehicle travel time under random traffic conditions, this paper proposed a calculation method, in which vehicle travel was simulated to calculate its travel time in stochastic traffic conditions. Based on the analysis of travel characteristics of mixed traffic flow with emergency vehicles, MATLAB was used to conduct numerical simulation to produce emergency vehicle travel time in different traffic density and the results were compared with present calculation method, a two-lane traffic flow cellular automaton model was established with modified lane-changing rules and speed-updating rules. The simulation results indicate that emergency vehicle only interfere the traffic flow around it but has no effect on total traffic flow, and the priority for emergency vehicle travel has good effect in the density of 0.12 to 0.36. When the density is less than or equal to 0.08, or greater than or equal to 0.24, emergency vehicle travel time increases nearly in direct proportion with the increase of travel distance, and the greater the density is, the greater the growth slope becomes. The study found that the existing

收稿日期:2014-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51308165);山东省自然科学基金项目(ZR2013EEQ003);

哈尔滨工业大学科研创新基金项目(HIT.NSRIF.2014134)

作者简介:赵韩涛(1978-),男,河南开封人,副教授,工学博士,E-mail:zhthitwh@163.com。

distance-travel time function applys to traffic conditions with low and high density, but lose utility in range of 0.12 to 0.2. 5 figs, 16 refs.

**Key words:** traffic engineering; traffic flow; cellular automaton; emergency vehicle; travel time

# 0 引 言

应急管理涵盖消防、执法、医疗等服务内容,以最大限度减少突发事件所造成的损失为宗旨,是城市社区的重要生命线。应急的实效性要求响应车辆以最短的时间到达突发事件地点实施救护、消防和抢险等,以确保事件产生的损失最小。因此,行程时间对于优化应急车辆的选址、资源配置和调度起到至关重要的作用,是路径诱导得以实现的关键因素。国内外在行程时间及其可靠性方面取得了较多的理论研究成果,并逐步将其投入实际应用<sup>[1-2]</sup>。但作为特殊出行者,应急车辆的出行特征及其在道路上的通行规则与一般社会车辆有较大区别,因此,现有理论成果和研究方法不能移植于应急车辆方面。因数据难以实时采集,在应用问题研究中应急车辆行程时间一般采用固定值而非随机变量的形式体现<sup>[3-5]</sup>。应急车辆行程时间的研究可归纳为 2 类:基于某些假设前提的理论推导模型和根据调查数据总结的计算模型,如行程时间-距离模型、有应急优先信号的行程时间计算模型、疏散路径动态路段行程时间模型、考虑应急车辆行驶规则的路段行程时间计算模型等;利用数学回归、神经网络、现有模型参数标定等方法建立的以实际数据为基础的计算公式<sup>[6-11]</sup>。综合分析表明:依据距离构建的行程时间模型以及考虑交叉口优先控制的计算方法都过于强调应急车辆的优先权,而基于历史数据采用解析方法和概率统计方法构建的模型难以反映道路交通流变化的高度随机性。

决定应急车辆行程时间的因素很多,包括道路条件、交通组成、交通管控措施等。相对于正常行驶的交通流而言,应急车辆是一种导致普通车辆行为发生改变的特殊事件。交通调查表明,应急车辆会干扰正常行驶的交通流,短期内改变交通流状态,造成道路通行能力下降、车辆延误增加,拥挤甚至堵塞的交通状况会导致应急车辆行程时间增加。对于某一路段而言,道路条件、管控措施对应急车辆行程时间的影响可以定量描述,实时行程时间的时空波动主要由分时段的交通流随机性决定。鉴于此,本文考虑从分析交通流特性的角度研究应急车辆行程时

间的确定。

# 1 交通流运行特性分析

应急车辆在执行任务时具备 2 个明显特征:警笛长鸣、有法可依的在保证安全前提下优先通行,包括逆向行驶、不限速度、交叉口优先信号控制等。本文重点分析有应急车辆通行时的基本路段交通流运行特性。

实际运行中,应急车辆的跟车、超车、变换车道、逆向通行等行为较为复杂。为简化问题,本文将应急车辆限定在速度较高的内侧车道行驶。为全面了解驾驶人遭遇应急车辆的反应,利用问卷调查的方法采集数据。问卷重点咨询交通流个体车辆在不同位置时听到警笛后的反应,不考虑驾驶人性别、年龄等因素。统计结果表明:85%的应急车辆前方非近邻车辆在条件允许时会试图加速离去或变换车道;而 90%的近邻车辆则换道意愿强烈,亮换道灯并强制换道的概率较大;90%的相邻车道车辆更多地选择保持匀速行驶或为换道车辆让行。

为分析应急车辆的影响,交通流模型需要侧重描述单个车辆的运行行为,因此宏观和介观模型是不适用的,而微观模型中跟驰模型存在着车辆不能超越的缺陷。本文考虑利用另一类微观模型即元胞自动机模型描述车辆在相互作用下的个体行为。

# 2 双车道元胞自动机模型

元胞自动机模型 (cellular automaton, 简称 CA) 将空间定义为一定形式的规则网格单元,按照一系列的局部更新规则在离散的时间维度上演化动态系统。交通流中的车辆本质上是离散的个体,利用元胞自动机模拟复杂交通流时空演变具有独特的优越性。

在 NS 模型 (1992 年,高速公路一维交通流元胞自动机模型) 和 BML 模型 (1992 年,城市道路二维交通流元胞自动机模型) 的基础上,物理学家和交通研究人员作了大量的工作,根据不同的交通现象进行扩展<sup>[12-16]</sup>,使得交通流元胞自动机模型逐渐走向成熟和完善。本文将应急车辆单元引入双车道 CA 模型,修改对应的换道规则,分析交通流基本参

数的相互关系,建立应急车辆行程时间的计算模型。

## 2.1 模型符号定义

元胞空间由 2 条并列长度为  $L$  的网格链组成,代表 2 个相邻车道, $i=1$  为内侧车道, $i=2$  为外侧车道。一个网格单元代表一个元胞,其状态为空或被速度为  $v_n^i(t)$  的车辆占据, $v_n^i(t)$  为非负整数,代表  $t$  时刻第  $n$  辆车可前行的网格数; $x_n(t)$  为该车所处的位置。城市道路行驶车辆种类包括:大车(如公共汽车、货车)、小车和应急车,对应的最高速度分别为  $v_{1\max}$ 、 $v_{2\max}$ 、 $v_{E\max}$ ,所占用的元胞数分别为 4 个、2 个、2 个。车辆在跟驰行驶或换道时保持一定速度,因此各车辆之间的相互距离对于保证安全至关重要。定义  $d_n^i(t)$  为车道  $i$  上车辆  $n$  在  $t$  时刻与前车的距离; $d_{3-i}^{nf}(t)$  为车道  $i$  上车辆  $n$  在  $t$  时刻与相邻车道上最近前车的距离; $d_{3-i}^{nb}(t)$  为车道  $i$  上车辆  $n$  在  $t$  时刻与相邻车道上最近后车的距离; $v_{nb}^{3-i}$  为车道  $i$  上车辆  $n$  在  $t$  时刻与相邻车道上距离最近后车的速度。为反映多车道条件下车辆在受阻时的反应,定义  $p_0$  为车辆为维持速度而选择换道的概率。

应急车辆在鸣笛通行时,在保证安全的前提下,以尽可能快的速度行驶,而普通车辆则改变了通常情况下的贪婪原则。为体现应急车辆对交通流的扰动,引入 2 个参数:①应急车辆影响区域  $D$ ,指从应急车辆所在位置到本车道前方受警笛影响的一段距离,其值与鸣笛音量、环境噪声以及驾驶人识别能力等相关;②普通车辆让行概率  $p$ ,位于应急车辆前方的近邻车辆所受影响最为直接,换道意愿强烈,若条件不允许,将亮转向灯请求强制换道,相邻车道最近后方车辆以一定的概率减速让行。

## 2.2 模型建立

应急车辆通行时间,主要受 2 个因素影响:一是时间段,高峰期的行程时间延误明显增大;二是空间容量,道路能否提供足够的空间(包括对向车道的空间)决定了社会车辆是否让行应急车辆。因此,应急车辆行程时间可基于时空限制的角度进行计算。

多车道 CA 模型的运行分为 2 个阶段。第 1 步:分析车辆换道需求,并判断是否满足换道条件,若满足,则车辆平移至临近车道,若不满足,则保持现状;第 2 步:按照单车道 CA 模型演化车辆位置和速度状态。本文考虑应急车辆对交通流的影响,修正 CA 模型。

### 2.2.1 换道规则

若道路上无应急车辆,交通流按照贪婪原则运行,满足下述条件时实施换道。

$$d_n^i(t) < \min(v_n^i(t) + 1, v_{\max}) \quad (1)$$

$$v_n^i(t) \leq d_{3-i}^{nf}(t), v_{nb}^{3-i}(t) \leq d_{3-i}^{nb}(t) \quad (2)$$

$$\text{rand}() < p_0 \quad (3)$$

此公式组定义为条件(1)。式(1)为行程时间最短原则,即和前车距离不足以维持速度而产生换道需求;式(2)为安全性原则,在相邻车道提供足够的可插入间隙时实施换道;式(3)为换道概率。

为维持速度并减少换道延误,应急车辆在通行时一般在内侧车道(1 车道),本文假定其在路段上不换道。应急车辆影响区域之内的车辆需根据其所处位置修正换道条件:

(1)应急车辆本车道前方  $D$  内非最近邻车辆,若满足条件(1)则换道;若式(2)满足而式(1)不符,则以概率  $p_1$  换道,增加换道规则

$$d_n^1(t) \geq \min(v_n^1(t) + 1, v_{\max}) \quad (4)$$

$$v_n^1(t) \leq d_2^{nf}(t), v_{nb}^2(t) \leq d_2^{nb}(t) \quad (5)$$

$$\text{rand}() < p_1 \quad (6)$$

此公式组定义为条件(2)。

(2)应急车辆本车道前方最近邻车辆,条件(1)和条件(2)满足时换道,其中  $p_1$  取值 1,表明该车不考虑行程时间最短原则,若相邻车道安全条件满足即换道。若无足够空间换道,该车将亮转向灯寻求强制换道,增加换道规则

$$d_n^1(t) \leq v_n^1(t) \leq d_2^{nf}(t) \quad (7)$$

$$2 \leq d_2^{nb}(t) \leq v_{nb}^2(t) \quad (8)$$

$$\text{rand}() < p \quad (9)$$

式中: $d_2^{nf}(t)$ 、 $d_2^{nb}(t)$  分别为车道 2 上车辆  $n$  在  $t$  时刻与相邻车道上最近前车、后车的距离; $v_{nb}^2(t)$  为车道 2 上车辆  $n$  在  $t$  时刻与相邻车道上最近后车的速度。

式(7)为该车与相邻车道前车的条件;式(8)为该车与相邻车道后车的条件;式(9)表明了相邻车道后车的减速让行概率。

(3)应急车辆相邻车道前方  $D$  内车辆均不换道。

### 2.2.2 单车道车辆状态演化

(1)加速过程

$$v_n^i(t+1) = \min(v_n^i(t) + 1, v_{\max})$$

(2)减速过程

$$v_n^i(t+1) = \min(v_n^i(t+1), d_n^i(t), v_{\max})$$

让行车辆以概率  $p$  实现

$$v_n^i(t+1) = \min(v_n^i(t+1), d_2^{nb}(t), v_{\max})$$

(3)随机慢化,以一定的概率实现

$$v_n^i(t+1) = \max(v_n^i(t+1) - 1, 0)$$

(4)位置更新

$$x_n^i(t+1)=x_n^i(t)+v_n^i(t+1)$$

3 数值模拟与结果

3.1 参数设置

为分析应急车辆影响下交通流系统的动力学性质,建立能够反映城市道路交通状况的元胞自动机模型。取元胞长度为 3.75 m,模拟车道由 1 000 个格点组成,对应道路实际长度为 3.75 km。假定道路上 3 种类型车辆的  $V_{\max}$  分别为 3、5、6(单位为每秒格数),对应的实际最大车速为:慢车 40.5 km/h、快车 67.5 km/h、应急车 81 km/h。数值模拟采用周期性边界条件,车辆右出左进,总数恒定,慢车比例  $R=0.05$ ,应急车辆为 1 辆。双车道车辆的总密度固定取值  $\rho$  为

$$\rho=N/2L$$
(10)

$t$  时刻  $j$  车道的密度  $\rho_j(t)$  为

$$\rho_j(t)=N_j(t)/L$$
(11)

平均速度  $V(t)$  为

$$V(t)=(1/N)\sum_{j=1}^2\sum_{i=1}^{N_j(t)}V_i^j(t)$$
(12)

式中: $N$  为车辆总数; $L$  为路段长度(即单车道元胞总数); $N_j(t)$  为  $t$  时刻  $j$  车道的车辆数; $V_i^j(t)$  为  $j$  车

道第  $i$  辆车在  $t$  时刻的速度。

初始时刻车辆速度为 0,随机分布于车道上。时步长取 1 s,模型每次运行 20 000 时步,记录每一时步时  $\rho_j(t)$ 、 $V_i^j(t)$ 、 $V(t)$  以及所有车辆的位置  $x_n(t)$ 。为消除随机性影响,取最后 2 000 时步的结果进行讨论。

3.2 结果分析

图 1 所示为不同密度条件下双车道交通流时空图,其中  $D=40$ ,  $p_0=0.5$ ,  $p_1=1$ ,  $p=1$ 。横坐标为从左至右位置移动的空间轴,纵坐标为从上到下时步递增的时间轴,黑点代表车辆位置。图 1(a)、图 1(b)表明在较低密度时( $\rho=0.04$ ),车辆以自由流速度行驶,因需要为应急车辆让行,2 车道车流较 1 车道车流密集,无阻塞现象发生。在中等密度程度时( $\rho=0.2$ ),图 1(c)、图 1(d)凸显了应急车辆对交通流的扰动,1 车道交通流均匀分布,各车流间无明显间隙,而 2 车道出现不同程度的空白,显示道路空间未充分利用,表明应急车辆影响主要体现在与其相邻的车道;另外,车辆保持一定的速度行驶,短时堵塞在两车道同时出现且能够迅速消散。在较高密度时( $\rho=0.4$ ),两车道车流运行无明显差别,均出现周期性阻塞,应急车辆对交通流影响甚微。

下页图 2 所示为  $D=40$ 、 $p_0=0.5$ 、 $p_1=1$ 、 $p=1$

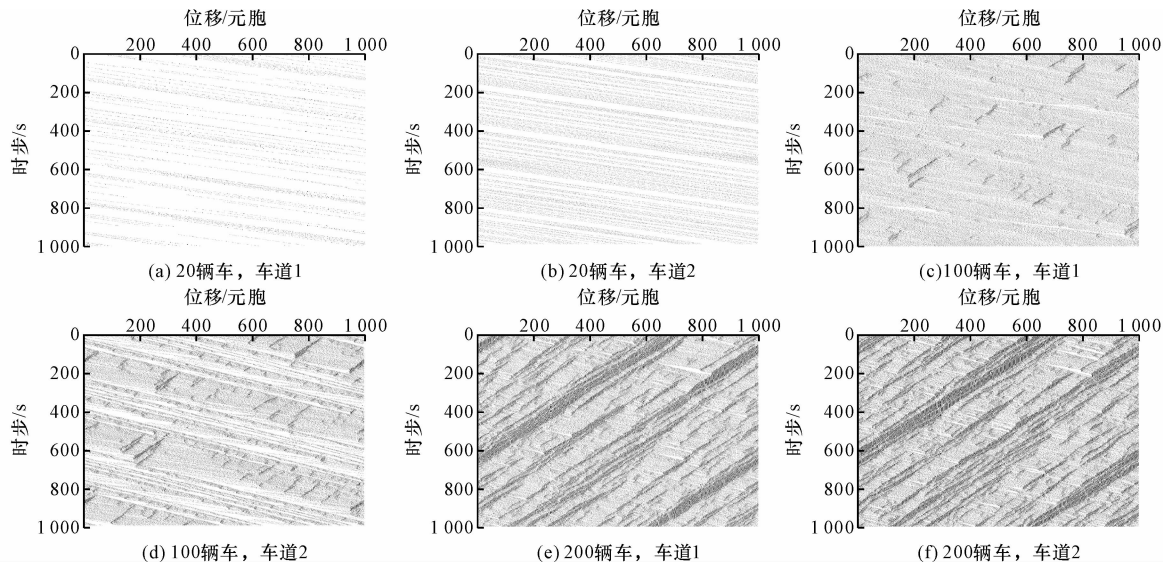


图 1 不同密度条件下双车道交通流时空

Fig. 1 Space-time of two-lane traffic flow under different density conditions

时的双车道交通流基本图。图 2 表明,所建模型的流量-密度曲线与经典交通流理论模型曲线相吻合:随着密度的增加,流量以较大的斜率增加,到达最佳密度后(图中  $\rho=0.24$ )以较小的斜率递减。当  $0.08\leq\rho\leq0.28$  时,1 车道流量增加,2 车道流量减少,表明

应急车辆因促使前方车辆加速驶离或换道而使得所在车道空间利用率提高,但对于道路整体流量的增减无明显作用。

下页图 3 所示为  $\rho=0.2$ 、 $D=40$ 、 $p_0=0.5$ 、 $p_1=1$ 、 $p=1$  时的每分钟平均速度图。分车道统计

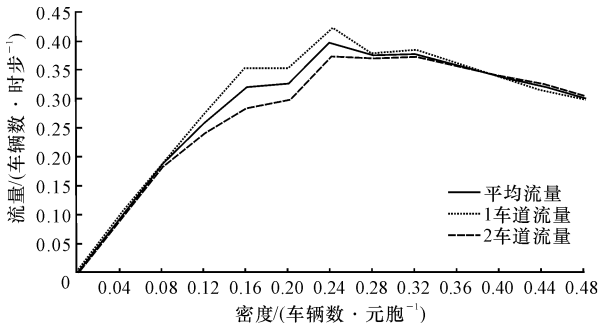


图2 双车道交通流基本图

Fig. 2 Fundamental diagram of two-lane traffic flow

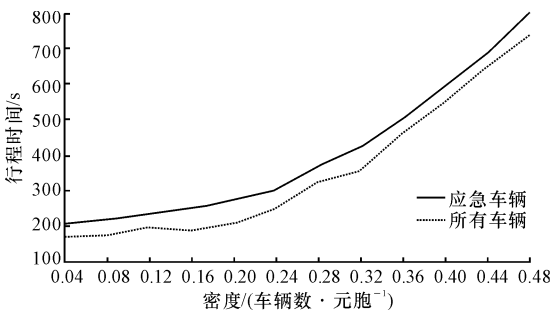


图4 行程时间与密度关系

Fig. 4 Relationship between travel time and density

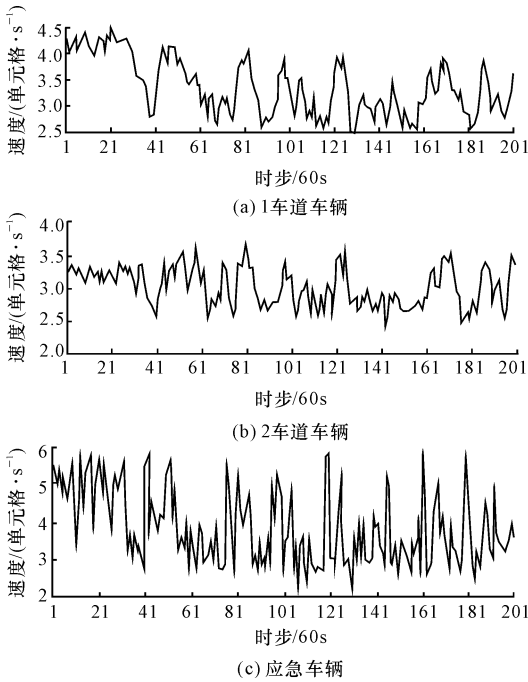


图3 不同车辆每分钟平均速度

Fig. 3 Average speed of different vehicles per minute

每分钟所有车辆的平均速度,总计 12 000 时步。模拟发现,平均速度在初始 20 min 时维持在一定的范围内,之后的 180 min 波动较大,说明在前 1 200 时步内仿真的伪随机性得以消除。1 车道车速值范围为 2.5~4.0(图 3(a)),2 车道车速值范围为 2.5~3.5(图 3(b)),两车道速度波动趋势相同;1 车道速度高的原因在于应急车辆对该车道交通流的良性影响,模拟所取密度为 0.2,与图(2)的流量-密度曲线结果相一致。图 3(c)为应急车辆速度在 2.8~5.5 间波动,明显高于普通车辆车速。

图 4 为  $D=40$ 、 $p_0=0.5$ 、 $p_1=1$ 、 $p=1$  时的行程时间与密度关系。图 4 表明,行程时间随密度增加而逐渐增加,符合车辆运行规律。当  $0.12 \leq \rho \leq 0.36$  时,应急车辆行程时间曲线向下偏离所有车辆行程时间曲线,表明在此密度范围内应急优先得以体现。

4 模型验证

Budge 等在行程时间-距离模型(KWH 函数)的基础上,利用实测数据对参数进行了标定<sup>[9]</sup>,其结果为

$$\begin{aligned} T &= m(d)e^{c(d)\tau} & \tau &= 4 \\ m(d) &= \begin{cases} 2.42\sqrt{d} & d \leq 4.13 \text{ km} \\ 2.46 + 0.596d & d > 4.13 \text{ km} \end{cases} \\ c(d) &= \frac{\sqrt{0.349 + 0.000\ 06m(d) + 0.038\ 8m(d)^2}}{m(d)} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $T$  为行程时间; $d$  为距离; $\tau$  为自由度。

由式(13)可见,KWH 函数认为应急车辆的行程时间主要由起终点之间的距离决定,4.13 km 是个分界点,超过 4.13 km 时车辆会在部分路段以巡航速度行驶。

为验证本文研究方法,修改元胞自动机格链长度,模拟生成不同密度、不同距离条件下的应急车辆行程时间,仿真结果如图 5(a)所示,图 5(b)为文献<sup>[9]</sup>依据式(13)做出的关系曲线。

由图可见:①总体上,行程时间随着距离的增加而递增,这与图 5(b)结果一致;具体到每单位里程对应的时间值并不相同,如  $\rho=0.32$  时的时间值几乎为  $\rho=0.08$  的 2 倍,缘于仿真设置不能完全再现实际道路交通状况。②在所验证的 7 种密度条件中,对应的行程时间差别较大; $\rho$  为 0.08、0.24、0.28 及 0.32 时行程时间的变化接近直线,密度越大,行程时间递增越快; $\rho$  为 0.12、0.16、0.2 时行程时间整体呈递增趋势,但中间有起伏(图中距离为 5~8 km 处),表明此密度时车流运动随机性较强。

5 结 语

(1)元胞自动机能够仿真应急车辆在交通流中的运行,所构建的模型对于分析其行程时间具有一定的适用性。

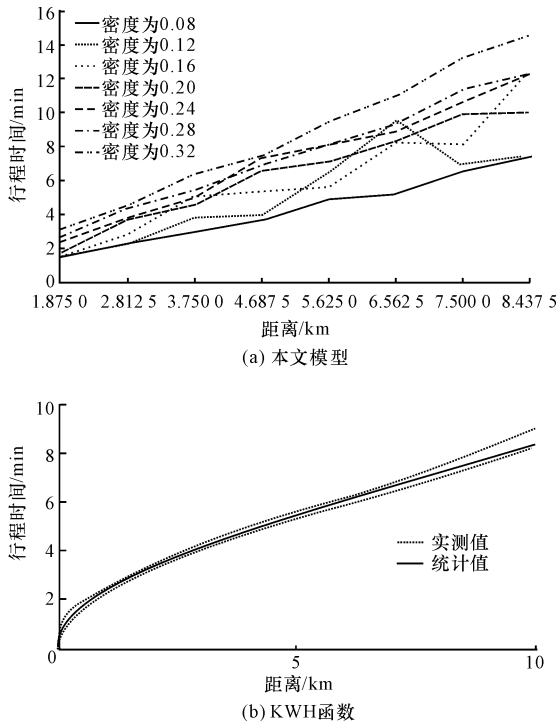


图 5 本文模型与 KWH 函数的行程时间计算结果对比  
Fig. 5 Contrast of travel time caculation results between the proposed model and KWH function

(2)单纯依靠统计数据标定应急车辆行程时间(KWH 函数)适用于低密度及高密度的情形;密度适中时拥堵随时出现即时消散的特征造成了应急车辆速度的极大波动,KWH 函数失去有效性。

(3)元胞自动机为预测应急车辆行程时间提供了新的研究工具,进一步研究应考虑驾驶人遭遇应急车辆时的心理和行为。需要特别指出的是,应急车辆通行环境各异,实时采集路况信息较为困难,而仅立足于少量数据提炼的计算公式缺乏普适性,如何改进其研究方法、凝练具有广泛意义的理论模型是有待解决的问题。

## 参考文献:

## References:

[1] 姜桂艳,李继伟,张春勤.城市主干路路段行程时间估计的 BPR 修正模型[J].西南交通大学学报,2010,45(1):124-129.  
JIANG Gui-yan, LI Ji-wei, ZHANG Chun-qin. Modified BPR functions for travel time estimation of urban arterial road segment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 124-129. (in Chinese)

[2] 张勇,白玉,杨晓光.城市道路网络的行程时间可靠性[J].系统工程理论与实践,2009,29(8):171-176.

ZHANG Yong, BAI Yu, YANG Xiao-guang. Travel time reliability in urban arterial networks[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2009, 29(8): 171-176. (in Chinese)

[3] Cheu R L, Lei H, Aldourir R. Optimal assignment of emergency response service units with time-dependent service demand and travel time [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2010, 14(4): 220-231.

[4] Lei H, Cheu R L, Aldouri R. Optimal allocation of emergency response service units to cover critical infrastructures with time-dependent service demand and travel time[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2137(1): 74-84.

[5] Gu Y, Yan X P. A dispatch model of emergency vehicles based on stochastic travel time[C]//ASCE. Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals-Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China. Chengdu: ASCE, 2008, 1565-1570.

[6] Peter K. A model for predicting average fire engine travel time [J]. Operations Research, 1975, 23(4): 603-613.

[7] Louisell C, Collura J. A simple algorithm to estimate emergency vehicle travel time savings on preemption equipped corridors: a method based on a field operational test [C]//TRB. Paper Presented in the 84th TRB Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2005: 1600-1605.

[8] 杨孝宽,官建,曹静.奥运会突发事件疏散路径动态路段行程时间[J].北京工业大学学报,2007,33(7):702-706.  
YANG Xiao-kuan, GONG Jian, CAO Jing. Dynamic link travel time for evacuation route in an emergency of Olympic games[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(7): 702-706. (in Chinese)

[9] Liang G H, Wang F J, Wang W, et al. Assessment of freeway work zone safety with improved cellular automata model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 261-271.

[10] 刘杨,沈海州,彭国雄.基于神经网络的应急车辆行程时间计算模型[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2007,31(6):973-975.  
LIU Yang, SHEN Hai-zhou, PENG Guo-xiong. Travel time model of emergency vehicle based on BP net-