

驾驶人注意分散的认知模拟与交通流特性

朱 彤^{1,2}, 胡月琦², 朱诗慧², 刘 伟², 刘浩学^{1,2}

(1. 长安大学 汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为研究执行车内次任务条件下驾驶人状态变化及其对交通运行造成的影响,首先基于理性思维的自适应控制系统(ACT-R)认知结构与 Distract-R 软件平台建立了 4 类次任务情况,分别对各类驾驶人注意分散状态及无次任务影响状态进行认知模拟;获得执行 4 类不同次任务时的驾驶人操作时间消耗与注意分散时间比数据。并以该数据构建驾驶人注意分散状态库,作为次任务条件下交通流仿真的基础数据。接着,在元胞自动机交通流模型(STCA)的基础上,修正减速规则并建立了考虑车内次任务影响的交通流模型;通过模型数据交换实现了基于元胞自动机模型与认知模型的联合仿真。最后,利用元胞自动机仿真 0%、10%、20% 的驾驶人在行驶中执行车内次任务时的交通流状况,次任务类型在 4 类次任务中随机抽取。试验结果表明:元胞自动机与认知模型联合仿真能够体现驾驶人心理差异及交通流变化特性;该模型修正了原有的元胞自动机减速规则,且能通过调用驾驶人注意分散状态库获取驾驶人状态参数;车内次任务会对交通流造成明显影响,使道路最大交通流量降低,当 10%、20% 的驾驶人执行次任务时,最大交通流量分别降低了 23.5%、40.7%,还造成了拥堵区域增多、排队加剧等现象;执行车内次任务不仅对驾驶安全产生影响,而且当一定比例驾驶人处于注意分散状态时,交通流整体状态也会受到显著影响。

关键词:交通工程;交通安全;驾驶人;注意分散;认知结构;ACT-R;交通流

中图分类号:U491.25

文献标志码:A

Cognition simulation and traffic flow characteristics analysis in driving distraction

ZHU Tong^{1,2}, HU Yue-qi², ZHU Shi-hui², LIU Wei², LIU Hao-xue^{1,2}

(1. Key Laboratory for Automotive Transportation Safety Enhancement Technology of the Ministry of Communication, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to investigate the changes of drivers state and its effects on the traffic flow under the condition of executing vehicle secondary tasks, first of all, based on adaptive control of thought-rational (ACT-R) cognitive structure and Distract-R software platform, four types of secondary tasks were established, and the distraction states of different drivers and the state of non-secondary tasks were simulated cognitively. Obtaining the ratio of the drivers' execution time and the distracting time during the performance of four types secondary tasks, and the driver

distraction state database was established as the basic data for traffic flow simulation under secondary tasks conditions; then, based on the cellular automata traffic flow STCA model, the rules of deceleration were modified and the traffic flow simulation model considering the effects of vehicle secondary task was established. The joint simulation of cellular automata model and cognitive model was realized through model data exchange. Finally, cellular automata simulation was used to simulate the traffic flow situations of 0, 10%, 20% drivers during executing vehicle secondary tasks when they are driving with the four task types randomly selected. Experimental data show that the joint simulation of cellular automata and cognitive model can reflect the psychological difference of drivers and variation characteristics of traffic flow; the model modifies the rules of original cellular automata deceleration, and parts of model parameters can be obtained by calling database of drivers' distraction states. Additionally, the vehicle secondary task causes obvious effects on the traffic flow to make the road maximize traffic capacity get reduced. The maximize traffic capacity reduced about 23.5% and 40.7% when 10%, 20% drivers executing secondary tasks, with the phenomena of increasing regional congestion and exacerbating queuing. Execution of vehicle secondary task not only causes the impact on the driving safety, but when drivers in the attention-distraction state reach a certain proportion, the overall state of the traffic flow is also significantly effected. 1 tab, 8 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; traffic safety; driver; distraction; cognitive structure; ACT-R; traffic flow

0 引言

驾驶人注意分散是影响道路交通安全的重要因素之一。事故统计表明,25.6%的交通事故与驾驶人的注意分散行为相关,其中瞌睡驾驶占2.6%，“看却未见”行为占9.7%，分心行为占13.3%^[1]。Beanland 等对澳大利亚国家交通事故数据进行研究分析,结果表明,大约57.6%的严重交通事故与驾驶人的注意分散行为相关,其中11.6%为驾驶分心行为,46%为其他不注意行为^[2]。特别是随着手机与车载信息系统的应用,使用车内次任务更为频繁,造成驾驶人注意分散的因素更为复杂。因此,有必要定量研究车内次任务下的驾驶人状态与交通流特性。

以往文献主要从心理学角度提出了驾驶人注意分散的基本概念,重点研究驾驶人在执行不同次任务时,驾驶绩效与注意状态的变化情况。驾驶人的注意力资源是有限的,当驾驶人执行次任务时,注意力资源会重新分配,引起注意状态的变化,改变驾驶绩效,主要体现在以下几方面:车速^[3-5]、反应时间^[6-7]、情景意识^[8-9]以及车辆横向控制^[10-12]等。除此之外,Jeon 等的研究显示,驾驶次任务会对驾驶人情绪造成较明显的影响^[13-14];Young 等研究发现,在执行听音乐任务时,驾驶人的眼球稳定程度会

受到影响^[15]。也有文献表明,视觉分心会对驾驶人的预估判断力造成干扰^[16];Kaber 等的研究表明,驾驶次任务增加了驾驶人的工作量,从而对其车辆控制及注视水平产生不同程度的影响^[17];马勇等研究了视觉分心对驾驶人注视行为的影响^[18]。

综上所述,近年来驾驶人注意分散问题多集中于研究各类微观驾驶行为上,国内外学者运用多种指标与试验方法反复验证了执行次任务对驾驶人注意状态及驾驶绩效存在显著影响。同时,相关文献表明,驾驶人注意分散对交通流也存在一定影响,且对交通安全有极大危害^[19-20]。但目前仍然缺乏对驾驶人注意分散状态与交通流特性的模拟研究和量化分析。鉴于此,本文利用理性思维的自适应控制系统(ACT-R)认知结构对驾驶人注意分散状态进行模拟,基于模拟结果,建立改进的元胞自动机模型,研究驾驶人注意分散状态下的交通流状态,并分析其特性与差异。

1 基于认知结构的驾驶人模型

20 世纪中叶 Stuart 等提出在心理学研究中应建立人类认知的整体结构模型^[21],而后结合心理学与计算机科学创建了认知科学。ACT-R 则是认知科学领域用于描述认知结构、解释认知机理的重要模型之一。目前,该模型已通过多种计算机语言予

以实现,成为应用于人类问题解决、学习、注意等研究最为广泛的工具^[22]。

ACT-R 认为人类的认知过程需要不同的模块参与,包括感知模块、运动模块、目标模块、陈述模块等^[23]。这些模块与人类脑部生理结构存在对应性,如海马体、枕叶、小脑等。模块各自独立工作,并且由中央产生式系统进行协调。其中,陈述模块存储基本事实,代表了记忆信息;目标模块跟踪当前意图;中央产生式系统存储了个体的程序性知识,程序性知识以 If-Then 规则(也称产生式规则)的形式呈现,只对存放在模块缓存中的信息做出反应。当满足一定条件时,各模块缓存即执行相应动作。产生式规则的不断触发能保证各模块相互配合,模拟个体做出连续认知过程。ACT-R 本质上是结构化的符号模型,可用结构关系(图 1)与规则来描述。

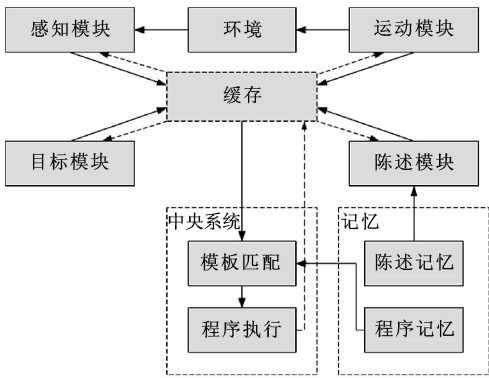


图 1 ACT-R 基本框架
Fig.1 ACT-R basic framework

Salvucci 建立了基于 JAVA 语言与 ACT-R 基本结构的 Distract-R 平台^[24],可对驾驶人认知状态进行模拟。研究中,利用该平台定义了驾驶主任务与 4 类次任务,并模拟驾驶人在多种次任务条件下的驾驶注意分散状态,输出的指标包括时间消耗与注意分散比等。时间消耗指完成次任务的时间长度;注意分散比指完成次任务过程中,驾驶人未用于驾驶任务的时间占总时间的比例。表 1 给出了各任务的含义,第 1 类任务为基本驾驶任务,后 4 类则需要执行主任务的同时完成不同的次任务。

认知模拟结果如图 2 所示。同样需要输出 13 个数字、5 个数字的情况下,复杂按键任务与复杂语音任务时间消耗基本一致,简单按键与简单语音也相差不多。然而,在注意力占比方面,按键任务与语音任务差异巨大,前者(R₂、R₃)明显大于后者(R₄、R₅)。而基本任务条件下,两指标均为 0。

认知模拟结果反映了执行次任务时,驾驶人个

表 1 任务类型

Tab.1 Task type

序号	次任务	任务简称	任务描述
R ₁	无	基本任务	驾驶人仅执行驾驶任务
R ₂	按 13 个数字	复杂按键	执行驾驶任务的同时,完成 13 个数字按键的操作
R ₃	按 5 个数字	简单按键	执行驾驶任务的同时,完成 5 个数字按键的操作
R ₄	语音报 13 个数字	复杂语音	执行驾驶任务的同时,完成 13 个数字的语音播报
R ₅	语音报 5 个数字	简单语音	执行驾驶任务的同时,完成 5 个数字的语音播报

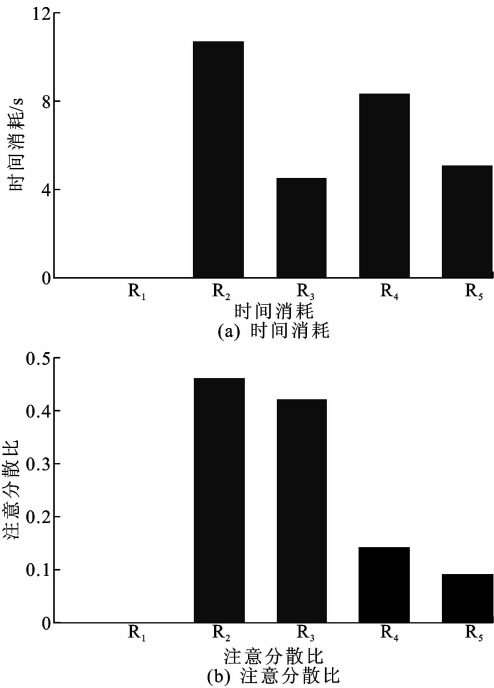


图 2 认知模拟结果
Fig.2 Cognitive simulation results

体的注意分散状态持续时间与严重程度。在实际的交通运行中,驾驶人可能在不同的时间,使用不同的次任务,但各类次任务可认为是按键次任务与语音次任务的组合。因此,对各类次任务组合进行认知模拟,将其结果作为驾驶人注意分散状态库(DDSD),供交通流模拟时调用。

2 基于元胞自动机的交通流模型

认知模拟可获得驾驶人个体的状态,但还不能描述交通流整体运行状态。选择元胞自动机模拟交通流状态。元胞自动机(cellular automata)是一种状态离散、局部空间相互作用、时间因果相关的网格动力学模型。Cremer 等将元胞自动机理论引入交通研究中^[25]。20 世纪 90 年代后,元胞自动机理论

被广泛应用于交通流研究中,德国学者 Nagel 和 Schreckenberg 提出了 NS 模型^[26],利用 4 条简单规则反映现实交通现象。针对 NS 模型的单车道、不可超车等局限性,很多学者相继对其进行改进、扩展,其中 Chowdhury 等提出的对称双车道元胞自动机模型(symmetric two-lane cellular automata, STCA)模型^[27]就是 NS 的扩展,其特点是引入了更符合现实交通流状态的双车道换道规则。本文在 STCA 模型的基础上,根据驾驶人注意分散特性对其予以修正。

交通流模型参数由于驾驶人特性差别而异,模型参数选择与 ACT-R 模型计算出的个体状态密切相关。元胞自动机模型每个网格位置代表 1 个元胞,给定瞬间元胞状态或为空,或被车占据。本次仿真采用一维离散网格链表示车道,每个网格长度为 7.5 m。每辆车的速度可以取 0,1,2,⋯, v_{\max} (v_{\max} 为车速最大值),时间步长取 1 s,在时间 $t \rightarrow t+1$ 的过程中,模型按以下 4 条规则进行演化:

步骤 1,加速规则,若 $v(t) \leq v_{\max}$,则 $v(t+1) = \min(v_{\max}, v(t)+1)$;

步骤 2,减速规则,若 $v(t) > g_{\text{ap}}$,则 $v(t+1) = g_{\text{ap}}$;

步骤 3,随机慢化,在概率 p 下, $v(t+1) = \max(v(t)-1, 0)$;

步骤 4,车辆运动, $x(t+1) = x(t) + v(t+1)$ 。

其中: g_{ap} 为本车与前车之间的空格数; $x(t)$ 为 t 时刻车辆位置; $v(t)$ 为 t 时刻车速。

以上 4 条规则反映出许多现实交通现象,但 NS 模型也存在局限性,如仅能模拟单车道交通流、不允许存在超车行为,这限制了 NS 模型的进一步发展。于是,很多学者在该模型基础之上进行了扩展,使其能更好符合现实交通流特性,如 Chowdhury 提出的 STCA 模型,该模型引入了更符合现实交通流状态的双车道换道规则^[27],即

$$C_n = \begin{cases} 1 - C_n & d_n < \min(v_n + 1, v_{\max}), d_{no} > d_n, d_{nb} > d_s \\ C_n & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_n 为第 n 辆车所在车道,且 $C_n = 0$ 或 1; d_n 、 d_{no} 、 d_{nb} 分别为第 n 辆车与前方车辆的间距、与相邻车道前方车辆的间距、与相邻车道后方车辆的间距; d_s 为模型中限定的安全换道阈值。

$d_n < \min(v_n + 1, v_{\max})$ 表示车辆在本道上不能按期望的速度行驶, $d_{no} > d_n$ 表示旁道上的行驶条件要比本道好。

3 交通流模拟与分析

3.1 交通流模拟参数设置

设置初始密度为 $\rho = 0.001$ (实际模拟中以空间占有率值替代密度,即车辆占据的元胞与元胞总数之比),每次迭代结束增加 0.05,且其不超过 1。同时,计算车速与流量数据,以此描述密度-车速和密度-流量曲线的变化。

交通流速度 v 计算式为

$$v = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (2)$$

式中: v_i 为当前运行时第 i 辆车的速度; N 为当前被占用元胞总数。

共运行模拟程序 1 050 次,为消除初始状态随机性影响,仅采集最后 50 次数据计算速度及流量,则运行 50 次的交通流速度平均值 \bar{v} 为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{50N} \quad (3)$$

利用流量 q 和密度 ρ 的关系有

$$q = \rho \bar{v} \quad (4)$$

定义 3 种驾驶人使用次任务的状态:第 1 种状态为常态,该状态下无驾驶人执行车内次任务;后 2 种状态(条件 I、II)分别模拟 10%、20% 驾驶人执行车内次任务时的交通流状态。当驾驶人执行次任务时,不再使用换道规则,而减速规则也与之不同。执行次任务时,由于受到影响而车速减慢,减慢至速度下限后维持于该速度。车速下限与注意分散比之间存在以下关系

$$\frac{1}{v_D} (1 - E) = \frac{1}{v_{\max}} \quad (5)$$

式中: v_D 为执行次任务时的速度,即速度下限; E 为注意分散比,可通过认知模拟获得。

次任务执行时间下限为次任务时间消耗,上限设置为 5 min,每次执行的时间在上下限间抽取。选择的次任务类型有 3 类:控制-语言/接听-控制、全部手动控制、全部语音控制。各参数在驾驶人注意分散状态库(DDSD)中提取。

3.2 交通流参数分析

驾驶人没有执行车内次任务时,即常态下获得的交通流参数如下页图 3 所示。

由图 3 可知:常态下,流量随密度 ρ 的增加而增大,当 $\rho = 0.23$ 时,流量达到峰值 0.425 元胞/s,即 765 veh/h,之后流量随密度的增加而下降;车辆平

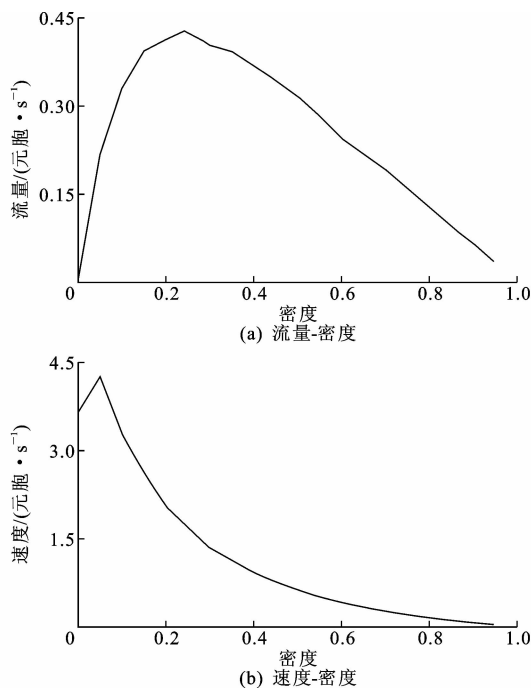


图 3 常态下交通流参数关系

Fig. 3 Relations of normal traffic flow parameters

均速度最大可达到 4.25 元胞/s,即 61.21 km/h,在密度增至 $\rho=0.05$ 时车速值出现拐点。

图 4 给出了条件 I 中双车道交通流仿真的速度-密度和流量-密度曲线。可见:平均速度最大可达 4 元胞/s,即 57.6 km/h,在密度 $\rho=0.05$ 时车速值出现拐点;仿真开始时,流量随密度的增加而增大,当 $\rho=0.19$ 时,流量达到峰值 0.325 元胞/s,即 585 veh/h,之后流量随密度的增加而下降。

图 5 给出了条件 II 中双车道交通流仿真的速度-密度和流量-密度曲线。可见:平均速度最大可达 3.51 元胞/s,即 50.54 km/h,在密度 $\rho=0.05$ 时车速值出现拐点;仿真开始时,流量随密度的增加而增大,当 $\rho=0.19$ 时,流量达到峰值 0.252 元胞/s,即 453.6 veh/h,之后流量随密度的增加而下降。与常态相比,条件 I、条件 II 下的最大交通流量分别降低了 23.5%、40.7%,最大平均车速分别降低了 5.9%、17.4%。部分驾驶人注意分散情况下微观的行为变化,导致了宏观交通流状态的差异。驾驶人行为的变化,不仅使本人驾驶的车辆运行状态发生变化,还导致后车运行速度、换道空间都受到不同程度的影响,道路上车辆平均速度相应下降;同时,道路最大流量也随之降低。自由流状态下对宏观交通流特性影响不明显;当车辆流量较大时,上述影响更为明显。比较而言,注意分散驾驶人比例越高,对流量极值和车速的影响越大。

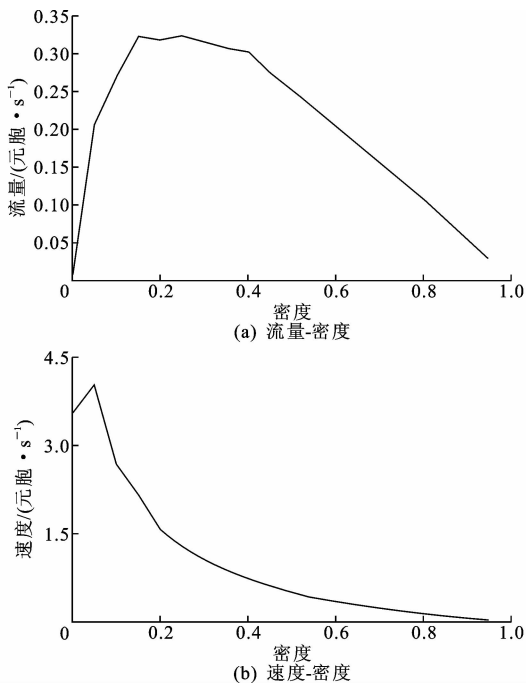


图 4 条件 I 交通流参数关系

Fig. 4 Relations of condition I traffic flow parameters

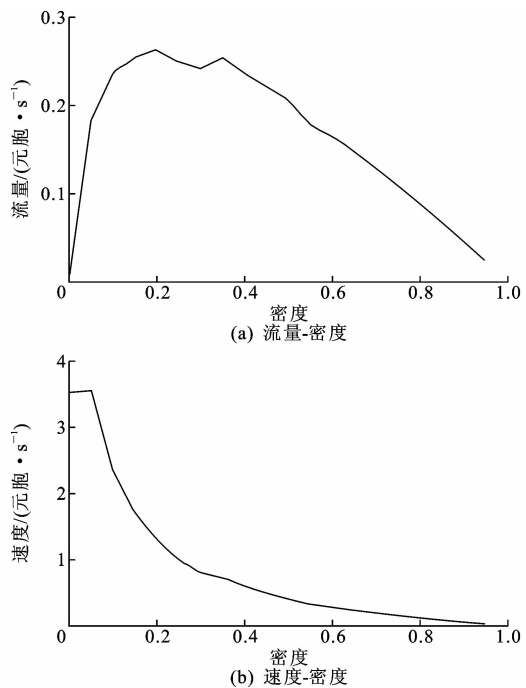


图 5 条件 II 交通流参数关系

Fig. 5 Relations of condition II traffic flow parameters

3.3 时空图分析

下页图 6~图 8 分别为常态下、条件 I、条件 II 下的车辆时空分布,数据点为车辆。密度 $\rho=0.201$ 时,图中给出了 600~720 共 120 个格点,从 260~400 共 240 个单位时间的演化过程。

可知,在条件 I、II 情况下,模拟过程中出现堵塞的区域比常态下更多,车辆位置的移动是非均匀

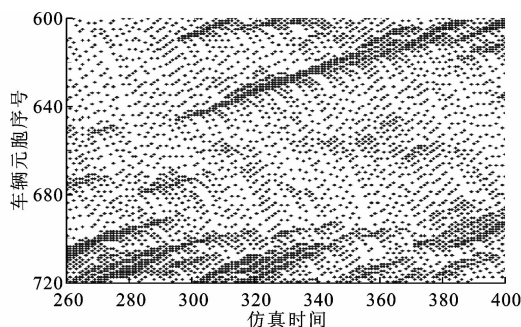


图6 常态下的车辆时空图

Fig. 6 Normal space-time diagram

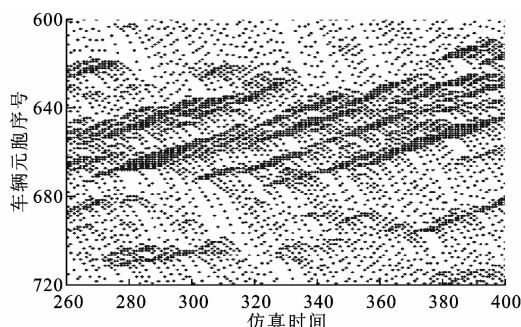


图7 条件I下的车辆时空图

Fig. 7 Condition I space-time diagram

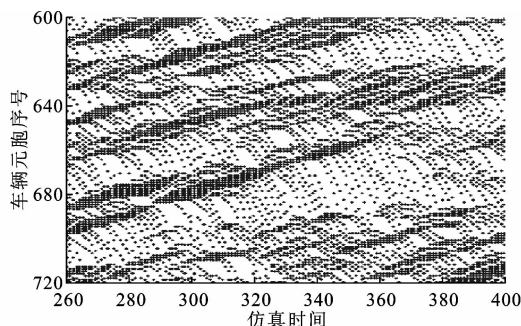


图8 条件II下的车辆时空图

Fig. 8 Condition II space-time diagram

的,车流的运动与堵塞交替出现,并且可看到拥堵位置前移。这可能是由于减速车辆增多,局部车辆密集增加,引起道路流量突然减小而引起的。数据点较为离散的区域表示车辆自由运动,密集区域表示车辆缓慢甚至停止前进聚集在一起。这是由于在条件I、II情况下,由于部分驾驶人注意分散,造成了后续车辆依次受到前车行为变化的影响,阻塞的区域增多。同样,注意分散驾驶人比例越高,上述现象发生的越频繁。

4 结 语

(1)比较5种任务条件下驾驶人状态可知,复杂按键任务与复杂语音任务时间消耗基本一致,简单

按键与简单语音时间消耗也相差不多。然而,在注意力占比方面,按键任务与语音任务差异较大,前者明显大于后者。基本任务条件下,任务时间消耗与注意力占比两指标均为0。

(2)通过模拟10%、20%驾驶人执行车内次任务时的交通流状态可知,驾驶人注意分散时,交通流拥堵位置前移,拥堵区域增多。当驾驶人注意分散人数占比增加时,流量、速度峰值均降低,达到流量峰值时的临界密度减小,并且达到峰值后的降低趋势变缓。与常态相比,条件I、条件II下的最大交通流量分别降低了23.5%、40.7%,最大平均车速分别降低了5.9%、17.4%。

(3)当驾驶人执行次任务而导致注意分散时,不仅对驾驶人个体的行为造成影响,也会对交通流整体运行状态造成较明显的影响。制定车载设备的使用与设计规范,能够降低驾驶人注意分散影响,不仅对交通安全有直接作用,对改善交通流运行状态也具有明显作用。

(4)以往文献对驾驶人注意分散情况下的交通流状态研究较少,主要原因在于缺乏相应的驾驶人建模工具。认知模型与交通流模型相结合,为上述建模提供了可能。本文方法能够刻画出更多、更复杂的微观行为模式,在后续研究中值得进一步研究与讨论。

参考文献:

References:

- [1] WANG J, KNIPLING R R, GOODMAN M J. The role of driver inattention in crashes: New statistics from the 1995 Crashworthiness Data System[C]// TRB. 40th Annual Proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine. Washington DC: TRB, 1996: 377-392.
- [2] BEANLAND V, FITZHARRIS M, YOUNG K L, et al. Driver inattention and driver distraction in serious casualty crashes: Data from the Australian national crash in-depth study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 54: 99-107.
- [3] SCHWEBEL D C, STAVRINOS D, BYINGTON K W, et al. Distraction and pedestrian safety: How talking on the phone, texting, and listening to music impact crossing the street[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 45: 266-271.
- [4] REIMER B, MEHLER B, DONMEZ B. A study of young adults examining phone dialing while driving using a touchscreen vs. a button style flip-phone[J].

- Transportation Research Part F,2014,23:57-68.
- [5] METZ B, LANDAU A, HARGUTT V. Frequency and impact of hands-free telephoning while driving: Results from naturalistic driving data[J]. Transportation Research Part F,2015,29:1-13
- [6] HAQUE M M, WASHINGTON S. The impact of mobile phone distraction on the braking behaviour of young drivers: A hazard-based duration model[J]. Transportation Research Part C,2015,50:13-27.
- [7] CHOUDHARY P, VELAGA N R. Modelling driver distraction effects due to mobile phone use on reaction time[J]. Transportation Research Part C,2017,77:351-365.
- [8] YANNIS G, LAIOU A, PAPANTONIOU P, et al. Impact of texting on young drivers' behavior and safety on urban and rural roads through a simulation experiment [J]. Journal of Safety Research,2014,49:25-31.
- [9] YOUNG K L, STEPHENS A N, LOGAN D B, et al. Investigating the impact of static roadside advertising on drivers' situation awareness [J]. Applied Ergonomics,2017,60:136-145.
- [10] PENG Y, BOYLE L N, LEE J D. Reading, typing, and driving: How interactions with in-vehicle systems degrade driving performance[J]. Transportation Research Part F,2014,27:182-191.
- [11] LIU Y. Effects of Taiwan in-vehicle cellular audio phone system on driving performance[J]. Safety Science,2003,41(6):531-542.
- [12] 石涌泉,郭应时,杨婉莹,等. 驾驶人视觉分心时转向操作和车道偏离特性研究[J]. 中国安全科学学报,2014,24(9):20-25.
- SHI Yong-quan, GUO Ying-shi, YANG Wan-ying, et al. Study on drivers' steering behavior and lane departure during visual distraction[J]. China Safety Science Journal,2014,24(9):20-25.
- [13] JEON M, WALKER B N, GABLE T M. The effects of social interactions with in-vehicle agents on a driver's angry level, driving performance, situation awareness, and perceived workload[J]. Applied Ergonomics,2015,50:185-199.
- [14] DULA C S, MARTIN B A, FOX R T, et al. Differing types of cellular phone conversations and dangerous driving[J]. Accident Analysis & Prevention,2011,43(1):187-193.
- [15] YOUNG K L, MITSOPOULOS-RUBENS E, RUDIN-BROWN C M, et al. The effects of using a portable music player on simulated driving performance and task-sharing strategies[J]. Applied Ergonomics,2012,43(4):738-46.
- [16] MUHRER E, VOLLRATH M. The effect of visual and cognitive distraction on driver's anticipation in a simulated car following scenario[J]. Transportation Research Part F,2011,14(6):555-566.
- [17] KABER D B, LIANG Y, ZHANG Y, et al. Driver performance effects of simultaneous visual and cognitive distraction and adaptation behavior[J]. Transportation Research Part F,2012,15(5):491-501.
- [18] 马 勇,付 锐. 驾驶人视觉特性与行车安全研究进展[J]. 中国公路学报,2015,28(6):82-94.
- MA Yong, FU Rui. Research and development of drivers visual behavior and driving safety[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(6):82-94.
- [19] COOPER J M, VLADISAVLJEVIC I, MEDEIROS-WARD N, et al. An investigation of driver distraction near the tipping point of traffic flow stability[J]. Human Factors,2009,51(2):261-268.
- [20] COLLET C, GUILLOT A, PETIT C. Phoning while driving I: A review of epidemiological, psychological, behavioural and physiological studies[J]. Ergonomics,2010,53(5):589-601.
- [21] STUART K C, THOMAS P M, ALEEN N. The psychology of human-computer interaction[J]. Ipsj Magazine,2003,44(9):978-992.
- [22] ANDERSON J R, BOTHELL D, BYRNE M D, et al. An integrated theory of the mind[J]. Psychological Review,2004,111(4):1036-1060.
- [23] 唐广智,胡裕靖,周新民,等. ACT-R 认知体系结构的理论与应用[J]. 计算机科学与探索,2014,8(10):1206-1215.
- TANG Guang-zhi, HU Yu-jing, ZHOU Xin-min, et al. Theory and application of ACT-R cognitive architecture[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology,2014,8(10):1206-1215.
- [24] SALVUCCI D D. Rapid prototyping and evaluation of in-vehicle interfaces[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction,2009,16(2):1-33.
- [25] CREMER M, LUDWIG J. A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations[J]. Mathematics & Computers in Simulation,1986,28(4):297-303.
- [26] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic [J]. Journal of Physics I,1992,2(12):2221-2229.
- [27] CHOWDHURY D, WOLF D E, SCHRECKENBERG M. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications,1997,235(3):417-439.