

文章编号:1007-5429(2014)04-0109-06

# 驾驶员换道执行持续时间研究

张 良, 陈诗慧, 张 伟

(汽车安全与节能国家重点实验室, 清华大学工业工程系, 北京 100084)

**摘要:** 换道行为的研究对于交通流分析和驾驶安全具有重要的意义。本研究采用三种方法收集换道时间数据: 实路高空观测、实路车内观测和驾驶模拟器测量。数据分析表明在一定速度区间内, 换道时间不受车辆行驶速度的影响, 而当在驾驶模拟器中速度区间继续扩大时, 速度的影响变得显著, 尤其是低速时换道时间显著延长。此外, 数据比较结果表明从换道执行开始到该换道被其他驾驶员发现至少存在 0.75s 延迟。

**关键词:** 换道行为; 换道时间; 实际道路观测; 驾驶仿真

**中图分类号:** U491.2+54

**文献标识码:** A

## Study on Lane Change Duration

ZHANG Liang, CHEN Shi-hui, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Study on lane change behavior is of great significance to traffic flow analysis and driving safety. This study collected lane change duration data via three methods: real road traffic flow observation, real road in-car observation, and driving simulation testing. The results show that lane change duration is not affected by the vehicle speed within a certain range, but when the range continues to extend in driving simulation, the effect of speed becomes significant. The duration is significantly prolonged especially at low speed. The data also indicate there is a delay of at least 0.75s from the execution of lane change to the time when it can be detected by the following driver.

**Key words:** lane change behavior; lane change duration; real road observation; driving simulation

## 1 引言

换道是道路上最常见的驾驶行为之一。据统计, 因换道引起的交通事故占交通事故总量的 4%~10%<sup>[1]</sup>。目前对于换道行为的研究多集中于换道前的决策过程(即什么情形下选择换道), 而对于换道执行过程(包括具体的信息处理和动作实施)的研究却非常少, 因此人们对于驾驶员究竟如何完成具

体的换道操作还没有一个清晰的认识<sup>[2,3]</sup>。换道执行过程的持续时间(简称换道时间)是研究文献中描述换道操作的常用指标, 同时它对于微观交通流模型的构建也具有重要的意义<sup>[3]</sup>。因此本研究从换道时间入手, 探究换道执行过程的角度和方法, 试图得出一些初步结论, 并为后续的深入研究提供一些启发。

已有的换道行为的研究中, 专门针对换道时间

收稿日期: 2013-10-10; 修回日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71371103); 人因工程重点实验室开放基金资助项目(HF2013-K-04)

作者简介: 张良(1990-), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要研究方向为驾驶安全与虚拟现实。

的研究非常少。通常是在对于换道行为的各类研究中涉及到换道时间的测量和简单的分析,总体而言主要包括对换道时间进行描述性统计分析,以及探究某些因素(如驾驶员年龄<sup>[4]</sup>、驾驶员性别<sup>[5,6]</sup>、车辆类型<sup>[3,7]</sup>、车辆速度<sup>[8]</sup>、车道宽度<sup>[8]</sup>、换道方向<sup>[4,5,6,8]</sup>、交通流状况<sup>[3,9]</sup>、驾驶员疲劳程度<sup>[10]</sup>等)对换道时间的影响。这些研究获取换道数据的方法主要分为三类:高空俯拍、使用车载装置收集和驾驶模

拟器收集,其中前两种方法使用较多。表 1 总结了文献中关于换道时间的主要观测结果。由于观测方法、观测路段、交通状况、甚至换道起止点的定义等很多因素的差异性,数据之间并不能直接进行比较,但是整体来看,俯视观测得到的时间往往比较短(4s 左右),而车载装置测量和驾驶模拟器得到的时间则相对较长(5s—6s)。

表 1 不同文献中的换道持续时间数据

观测方法	文献来源	均值(s)	标准差(s)	范围(s)	备注
高空俯拍	Toledo 和 Zohar(2007) <sup>[3]</sup>	4.6	2.3	1.0—13.3	乘用车;美国高速公路
		3.8	2.4	1.1—11.8	重型车;美国高速公路
	Thiemann 等(2008) <sup>[11]</sup>	4.01	2.31	—	美国城市干道/高速公路
	Gurupackiam 和 Jones(2011) <sup>[9]</sup>	4.2	0.85	2.3—6.1	乘用车;美国城市干道
	Tijerina 等(1997) <sup>[12]</sup>	5.0	—	3.5—6.5	城市街道
车载装置		5.8	—	3.5—8.5	高速公路
	Hetrick(1997) <sup>[4]</sup>	6.0 <sup>+</sup>	—	3.4—13.6	城市街道和高速公路
	Hanowski(2000) <sup>[10]</sup>	4.8 <sup>*</sup>	1.71	1.1—16.5	短途货车
	Lee 等(2004) <sup>[6]</sup>	6.28	2.0	—	轿车和 SUV
模拟器	Salvucci 和 Liu(2002) <sup>[2]</sup>	5.14	0.84	—	高速公路

<sup>+</sup>表示众数

<sup>\*</sup>表示如果增加开头时间应为 6.0s<sup>[11]</sup>

由于本研究是对换道执行过程的初步探索,为了避免过多因素的引入使得分析复杂化,研究中着重选择车辆速度这一因素来探究其对换道时间的影响。在 Van Winsum 等(1999)<sup>[8]</sup>的研究中,速度对换道时间没有产生显著影响(速度区间约为 14m/s 到 33m/s)。他们提出,换道初始阶段中当车速增大时,驾驶员会通过减小打方向盘的幅度来保证一个比较可控的越过车道线时间(TLC, Time to Line Crossing,指车辆任一部位越过车道边界线的剩余时间)。这种安全余量的需求可以在一定程度上解释上述现象。

本研究中通过实际道路高空观测、实际道路车内观测和驾驶模拟器测量三种方法获取换道执行过程的数据,并对不同方法得到的换道总时间进行对比分析,同时还探究了车辆行驶速度对换道执行过

程的影响,为后续深入探究换道执行过程打下基础。

## 2 数据收集

### 2.1 实际道路高空观测

在北京市南三环洋桥路段及京藏高速西三旗桥路段(封闭性好、无非机动车和行人干扰,无信号灯)各寻找一个高的观测点,固定一台摄像机进行俯视拍摄(如图 1)。拍摄时段为两天的早上 7:30—8:00,下午 3:30—4:00,及晚上 5:45—6:15,这三个时间段比较好地涵盖了该路段高峰、低谷及过渡时段,且拍摄过程中车流连续、密度适中。

在镜头中标记两个距离合适的参照物(如图 1 中的白线),测量并记录现实场景中两者的距离以及目标车辆通过两个参照物的时间点,以此来计算目标车辆的车速;对于换道时间,在视频画面中将车辆



图 1 实际道路高空观测画面和标记物

开始有明显侧向偏移的时候标记为换道起始点,当车辆中心位于目标车道中,并不再发生侧向偏移时,将该时刻标记为截止点。剔除大型车辆和连续换道的数据后,共得到 148 次换道的行驶速度和换道时间数据,其中 80 次向左换道,68 次向右换道。

## 2.2 实际道路车内观测

在北京市四环路上随机寻找 8 位出租车司机,拍摄他们在一段时间(约 20 分钟)内驾驶过程中的方向盘运动。拍摄时在前挡风玻璃上安装一种吸顶式摄像头,以完整、正交地记录方向盘运动(如图 2 所示,其中画中画为吸顶式摄像头拍摄到的画面,方向盘上固定的白色胶带表示零点位置),并用另外一台摄像机拍摄前方道路的画面,以便读取数据时更准确地识别换道。驾驶过程中交通流主要为过渡或顺畅状态,且司机被引导以自然状态驾驶和换道。最终观测共得到 148 次换道的数据,78 次向左换道,70 次向右换道。

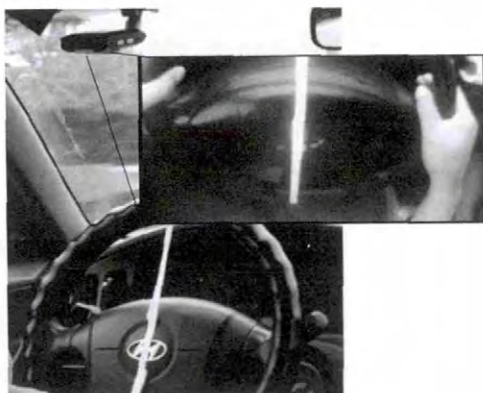


图2 实际道路车内观测数据收集方法示意图  
(画中画为吸顶式摄像头拍摄到的画面)

## 2.3 驾驶模拟器实验测量

### 2.3.1 被试

共有 16 位被试参与本部分仿真实验,他们都持有机动车驾驶证,详细信息见表 2。

### 2.3.2 实验设备和场景

实验在一个固定基座驾驶模拟器中进行。模拟器由一辆汽车改造而成,可收集常见的驾驶数据,如方向盘、油门、刹车、车速、车头转角、位移等,投影系统将计算机生成的驾驶员前方的视野投影在汽车前方的环形屏幕上。实验中使用的虚拟场景是一个单向两车道城市道路,且无其他车流。为了避免驾驶员操作的波动给数据分析带来更大的变异性<sup>[13]</sup>,本实验将换道时的车速控制在一个固定的值,驾驶员仅需操纵方向盘进行换道。此外,本模拟器的方向

盘没有力反馈系统,且没有自动回正,因此正式实验前充分的适应性练习尤为重要。

### 2.3.3 实验过程

实验开始前,实验人员向被试介绍实验目的,被试填写知情同意书并观看实验引导录像;然后被试进入模拟器进行车道保持和换道操作的练习,当被试能够稳定地操作方向盘完成换道时,练习终止,开始正式实验。

正式实验包括 5 个部分,被试需要分别在 5 种速度(10m/s,15m/s,20m/s,25m/s 或 30m/s)下按照指令进行换道操作,每种速度下向左右两个方向交替换道共 6 次,最终每个被试换道 30 次。16 个被试中,8 个被试的车速由低速逐渐加快,另外 8 个的车速逐渐减慢。每次换道前,模拟器会给出换道准备提示语音,3s 后屏幕上会出现要求向左或者向右换道的指示箭头,被试按照箭头指示进行换道。两次换道间隔 30s,且被试被告知并不需要尽快完成换道,只需像真实驾驶中一样自然地完成换道。

表2 被试信息

性别	详细信息(人数)		
	男:10	女:6	
年龄	<25岁:9	26—35岁:7	>35岁:2
驾龄	0.5—2年:4	2—4年:6	>4年:6
驾驶里程	<10000km:8	10000—50000km:5	>50000km:3

### 2.3.4 数据筛选和预处理

由于有两名被试在换道过程中方向盘操作非常不稳定,他们的数据被剔除。对于其余被试,在每个被试每种速度每个方向下各选择了一次方向盘转角曲线最光滑的换道进行数据读取。最终共得到了 14 个被试 140 次换道的数据。

## 3 观测数据和实验结果

### 3.1 实际道路高空观测结果

对于收集到的 148 次换道,换道时间均值为 3.90s( $SD=0.77s$ ),换道时车速均值为 18.63m/s( $SD=3.32m/s$ ),其分布直方图见图 3 和图 4。换道时间和行驶速度的散点图如图 5 所示,相关性分析表明换道时间与速度几乎不存在相关关系( $Pearson=-0.165, p=0.046$ )。

### 3.2 实际道路车内观测结果

车内观测得到的 148 次换道的总时长均值为 5.38s( $SD=1.05s$ )。

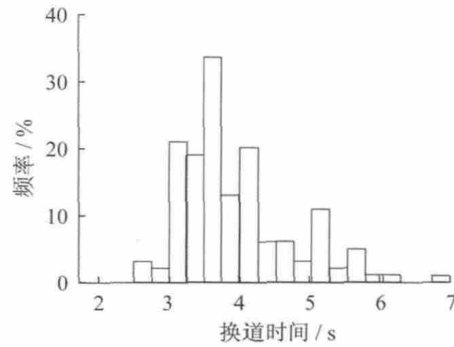


图 3 换道时间频率分布直方图

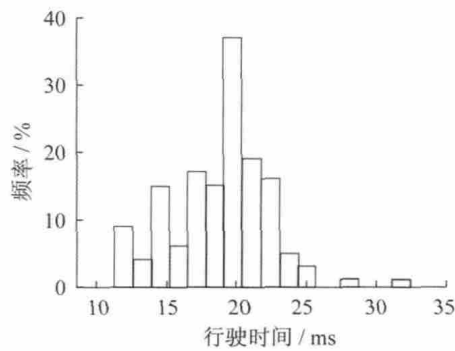


图 4 行驶速度频率分布直方图

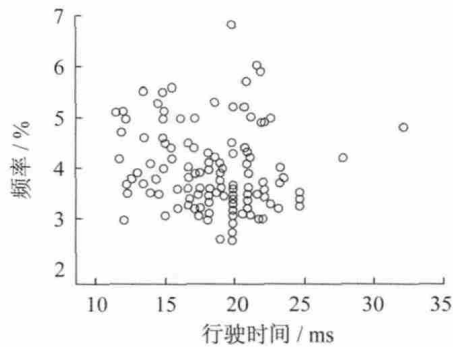


图 5 换道时间和行驶速度的散点图

### 3.3 驾驶模拟器实验测量结果

图 6 代表了一次换道过程中方向盘转角和车辆的横向位移随时间的变化情况,方向盘的转角时序图基本呈正弦曲线,对应于车辆的横向位移呈现一个平滑的偏移曲线。本研究选取方向盘转角的两个峰值(峰值 1 和峰值 2)来对方向盘的操作进行分析。换道时间和方向盘转角峰值绝对值的描述统计量见表 3。

#### 3.3.1 三种观测方法得到的换道时间的对比

三种观测方法得到的换道持续时间由短到长的排序为:实际道路高空观测 ( $M = 3.90s, SD = 0.77s$ ),实际道路车内观测 ( $M = 5.38s, SD = 1.05s$ ),模拟器实验观测 ( $M = 5.95s, SD = 1.32s$ )。

表 3 换道时间和方向盘转角峰值的描述性统计量

速度 (m/s)	样本 量	换道 时间(s)		方向盘转角峰 值 1 的绝对值(度)		方向盘转角峰 值 2 的绝对值(度)	
		均值	SD	均值	SD	均值	SD
10	28	6.97	1.29	36.57	12.52	35.39	11.65
15	28	6.10	1.11	30.39	10.24	32.86	9.26
20	28	5.99	1.22	23.63	9.32	26.43	11.43
25	28	5.54	1.27	20.87	7.13	24.23	10.88
30	28	5.16	1.02	20.37	7.30	23.55	8.86
总和	140	5.95	1.32	26.36	11.26	28.49	11.37

对三组换道时间数据进行独立样本  $t$  检验,发现两两都存在显著差异,且  $p < 0.001$ 。

#### 3.3.2 驾驶速度对换道时间的影响

ANOVA 分析发现换道时间随着速度显著变化,  $F(4,135) = 9.257, p < 0.001$ 。由图 7 中的事后两两比较的结果可以看出,整体趋势是换道时间随着速度增大而变短,但是显著性的差异主要存在于 10m/s 与部分更高速度之间和 30m/s 与部分更低速度之间。中间的速度区间内(即 15m/s, 20m/s 和 25m/s),换道时间不存在显著性差异,这一结论与上述高空观测结果吻合。

#### 3.3.3 方向盘转角峰值

配对  $t$  检验表明第二个方向盘转角峰值的绝对值 ( $M = 28.49, SD = 11.37$ ) 显著大于第一个峰值的绝对值 ( $M = 26.36, SD = 11.26$ ),  $t(139) = -2.817, p = 0.006$ 。ANOVA 分析表明,随着速度增大,方向盘转角的两个峰值都显著变小(图 8),对于第一个峰值,  $F(4,135) = 13.91 (p < 0.001)$ ,对于第二个峰值  $F(4,135) = 6.72 (p < 0.001)$ 。

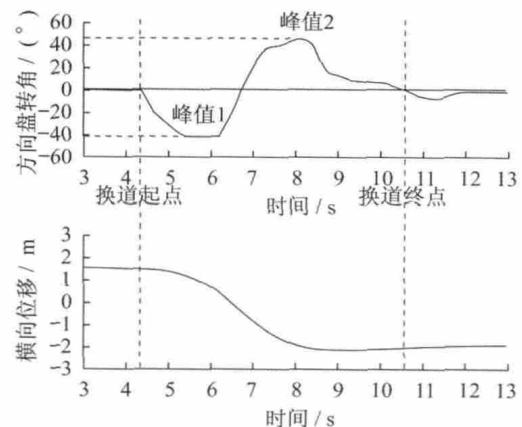


图 6 换道操作的方向盘转角时序图和横向位移时序图(来自某位被试的某次换道)



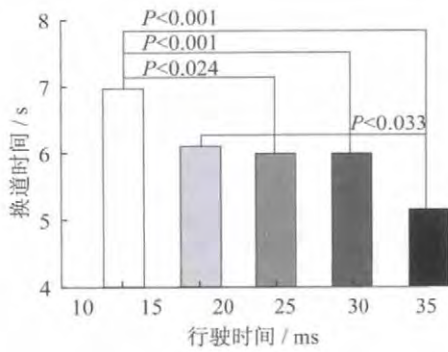


图7 不同速度下换道持续时间的比较

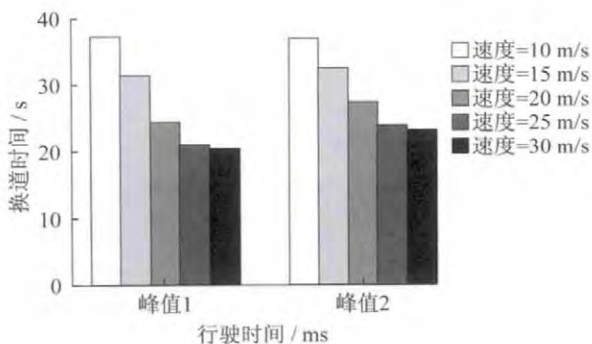


图8 不同速度下的平均方向盘转角峰值

## 4 讨论

### 4.1 三种研究方法得到的换道时间比较

从结果部分看出,三种观测方法得到的换道总时间是存在显著差异的,实际道路空中俯拍得到的换道时间( $M=3.90s$ )远小于实路驾驶车内读取的换道时间( $M=5.38s$ ),后者相比前者高出38%;而实路驾驶车内读取的时间又小于驾驶模拟器读取的换道时间( $M=5.95s$ ),后者比前者又高出10.6%。这与以前文献调研的结果大体一致。

实路高空观测数据和实路车内观测数据最主要的差别在于换道起止点的识别。当方向盘角度比较小时,车身的侧向位移并不明显,因而在宏观俯视读取数据时换道执行的开始往往滞后,而末尾阶段往往提前,这段时间大约有 $1.5s$ ( $\approx 5.38s - 3.90s$ )。如果假设换道执行过程是相对车道线对称的,则从开始换道到驶过车道线的实际动作共 $2.69s$ ( $5.38/2$ ),而其他驾驶员看到的这个动作仅有 $1.95s$ ( $3.90/2$ ),即从驾驶员开始换道到换道偏移被其他驾驶员识别至少会有 $0.75s$ 的延迟( $1.5/2$ ),这个延迟对于周围驾驶员可用的反应时间有很大的影响。因此,让驾驶员认识到这种感知的偏差,或许对于驾驶员更平缓地换道以及提前给出换道意图(如提前

打转向灯),降低事故发生率有重要的意义。

实路车内观测数据和仿真实验数据的差异可能来自于多个方面。一个主要来源是方向盘的性能差别。驾驶模拟器中的方向盘缺少力反馈和自动回正,导致驾驶员对于方向盘的控制波动比较大,换道的难度增加,所以换道操作相对更谨慎、缓慢。因此,若运用本实验中的驾驶模拟器进行换道执行过程研究,还需要将模拟器的效度进一步地提高。另一个可能带来差异的因素是换道时周围车流的情况,仿真实验中没有设置车流,而实路观测时周围存在车流,周围车辆的行驶状态和行为或许会对驾驶员的换道行为产生影响。此外,实路车内观测时选择的被试都是出租车司机,出租车司机在驾驶员中是一个具有其特殊性的群体,Yang等(2009)研究表明出租车司机的换道频率更高,换道时可接受的换道间距更小<sup>[14]</sup>,因此其换道时间可能也会与普通驾驶员有不同。

### 4.2 驾驶速度对于换道执行过程的影响

由数据结果可以看出,在一定速度区间内( $15m/s$ 至 $25m/s$ ,对应于 $54km/h$ 至 $90km/h$ ),换道时间不会因为车速快而明显变短,也不会因为车速慢而明显变长。这与以往研究中的数据结果是相似的。从方向盘转角峰值随车速变化的情况可以看出,车速越快,驾驶员打方向盘的速度越慢,幅度越小,进而车头转角越小,所以虽然车速增大,但车辆的侧向速度变化幅度不大,因而换道时间保持稳定,反之亦然。因此,我们猜测有一种机理使得驾驶员通过协调车速和方向盘操作幅度来保证一个合适的换道执行时间,这种机理可能是源于驾驶员的信息处理限制或动作限制,也可能是安全余量需求。

进一步分析模拟器实验的数据,我们发现当车速的区间继续向两端增大时,高速和低速下的换道时间出现了显著差异,尤其是当车速低至 $10m/s$ 时(对应 $36km/h$ ,一般实际道路上已经因为车速过低而无法形成平稳车流),换道时间明显延长。从方向盘转角的峰值来看, $10m/s$ 时打方向盘的幅度与中等速度( $15m/s$ 到 $25m/s$ )时相比是显著增大的,但是却没有大到可以抵消掉低速的影响的程度,因而换道时间比中等速度( $15m/s$ 到 $25m/s$ )下的时间要长。可能的解释是驾驶员的协调机制只在一定的范围内有效,当驾驶任务的要求超过这个范围时,人就无法通过自身的协调来保持舒适、安全的驾驶。

## 5 结论和展望

本研究以换道时间为切入点,对换道执行过程的研究角度及研究方法进行了初步地探究。通过高空观测和车内观测的数据对比发现,从驾驶员开始换道到换道偏移被其他驾驶员识别至少会有 0.75s 的延迟,因此,帮助驾驶员意识到这种偏差,对于安全换道、降低事故发生几率会有重要的意义。实际道路观测数据和模拟器测量数据均表明在一定速度范围内,驾驶员会通过方向盘转动和车速的协调配合,来将换道时间保持在一个相对稳定的数值左右,而在模拟器中当车速偏低(本研究中为 10m/s)时,换道时间会显著延长。另外,通过对三种换道观测方法进行对比发现,驾驶模拟器测量方法可以获得更细节的数据,而且实验环境下的交通状况可控,因此在后续对于换道执行过程进行进一步深入研究时可采用这种方法。

## 参考文献:

- [1] Van Dijk T, van der Heijden G A J. VisionSense: an advanced lateral collision warning system [C]. Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, IEEE, 2005: 296-301.
- [2] Salvucci D D, Liu A. The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior [J]. Transportation research part F: traffic psychology and behavior, 2002, 5(2): 123-132.
- [3] Toledo T, Zohar D. Modeling duration of lane changes [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 1999(1): 71-78.
- [4] Hetrick S. Examination of driver lane change behavior and the potential effectiveness of warning onset rules for lane change or "side" crash avoidance systems [D]. Virginia Polytechnic, 1997.
- [5] Olsen E C B. Modeling slow lead vehicle lane changing [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [6] Lee S E, Olsen E C B, Wierwille W W. A comprehensive examination of naturalistic lane-changes [R]. DOT HS 809702, NHTSA, U. S. Department of Transportation, Washington D C, 2004.
- [7] Kayvan A, Moridpour S, Young W, Majid S. Investigating heavy vehicle lane changing manoeuvres [C]. Transportation Research Board Annual Meeting, 90th, 2011, Washington D C, USA, 2011: (11-1586).
- [8] Van Winsum W, de Waard D, Brookhuis K A. Lane change manoeuvres and safety margins [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2(3): 139-149.
- [9] Gurupackiam S, Jones S L. Empirical Study of Lane Changing in Urban Streets under Varying Traffic Conditions [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011, 16: 259-269.
- [10] Hanowski R J. The impact of local/short haul operations on driver fatigue [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [11] Thiemann C, Treiber M, Kesting A. Estimating acceleration and lane-changing dynamics from next generation simulation trajectory data [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2088(1): 90-101.
- [12] Tijerina L, Garrott W R, Glecker M, Parmer E. Van and Passenger Car Driver Eye Glance Behavior During Lane Change Decision Phase, Interim Report [R]. Transportation Research Center Report. NHTSA, US Department of Transportation, 1997.
- [13] Hildreth E C, Beusmans J M H, Boer E R, Royden C S. From vision to action: experiments and models of steering control during driving [J]. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2000, 26(3): 1106.
- [14] Yang L, Sun Q, Chen S, Huang Y. Safety analysis of taxi lane changing behavior [C]. 5th Advanced Forum on Transportation of China (AFTC 2009), Beijing, China, 2009: 199-203.
- [41] Huang A. A research taxonomy for e-commerce system usability [C]. In Proceeding of the 8th Americas Conference on Information System, Dallas, 2002: 638-642.
- [42] O'Brien H L. The influence of hedonic and utilitarian motivations on user engagement: The case of online shopping experiences [J]. Interacting with Computers, 2010, 22(5): 344-352.
- [43] Moshagen M, Thielsch M T. Facets of visual aesthetics [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2010, 68(10): 689-709.
- [44] 徐意能, 陈硕. 基于用户体验的搜索引擎有效性评估研究 [J]. 人类工效学, 2008, 14(3): 9-12.
- [45] 罗仕鉴, 朱上上, 应放天, 等. 手机界面中基于情境的用户体验设计 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 239-248.

(上接第 97 页)