

驾驶人行为模型的研究综述

陈 涛,陈燕芹,邓 刚,魏 朗

(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)

摘 要:人车路系统研究中的驾驶人行为模型描述了人的认知、处理和操控行为过程,是车辆开发、交通仿真、车路协同、道路安全评价等方面闭环仿真的理论研究前沿,受到越来越多交通运输和车辆工程领域学者们的关注。为了更好地研究和应用驾驶人行为模型,系统地回顾了驾驶人行为模型近年来的研究进展、代表性研究成果及相关文献等,依据驾驶人行为模型的分类方法将其分为描述性模型和功能性模型。在阐述 2 类模型的基础上,对驾驶人行为模型进行具体划分,并论述其在驾驶人培训、车辆安全设施效用评价以及高级辅助驾驶系统等方面的应用。研究结果表明:驾驶人行为复杂多变,现有模型只能解释驾驶人的部分特征,并且驾驶人行为模型大都缺乏可靠的数据支撑,今后应结合具体的驾驶环境与详实的试验数据全面分析驾驶人行为。展望驾驶人行为模型的发展趋势,为建立适合中国交通的驾驶人行为模型提供参考。

关键词:交通工程;驾驶人行为;描述性模型;功能性模型;综述

中图分类号:U471.3

文献标志码:A

Review of driver behavior models

CHEN Tao, CHEN Yan-qin, DENG Gang, WEI Lang

(Key Laboratory of Automobile Transportation Safety Techniques of Ministry of Transport,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The driver behavior model of people-vehicle-road system depicts the cognition, process and manipulation processes of human beings which is the theoretical research edge of closed loop simulation in aspects of automobile development, traffic simulation, cooperative vehicle infrastructure and the road safety evaluation. Scholars in fields of transportation and vehicle engineering have paid attention to the model. In order to well investigate and apply this model, this paper reviewed the development of driver behavior models systematically in recent years representative research results and literature. Based on modeling ideas, driver behavior models could be classified into descriptive models and functional models. On the basis of elaborations of each model, the models were specifically classified. Furthermore, its applications were described on driver training, utility evaluation of safety facilities in cars, and advanced driving assistance systems, etc. The results show that drivers' behaviors are quite complex, however, the existing behavior models just could explain drivers' characteristics partly and lack reliable data to support. It is very important to comprehensively analyze driver behavior models combining specific driving

conditions and detailed test data in the future. Finally, the development trend of driver behavior models is proposed to provide reference for driver behavior models with traffic characteristics in China. 3 tabs, 7 figs, 76 refs.

Key words: traffic engineering; driver behavior; descriptive model; functional model; review

0 引 言

随着现代社会机动化程度的提高,交通事故对人们的生产、生活带来较大影响,交通安全问题也越来越受到人们重视。2011 年,中国共报道道路交通事故 422.4 万起,同比增加 31.8 万起,其中涉及人员伤亡的道路交通事故 210 812 起,造成 62 387 人死亡,237 421 人受伤,直接财产损失 10.8 亿元^[1]。许多因素例如天气、交通环境、驾驶车辆以及人为因素等均会影响行车安全,其中人为因素是造成交通事故的最主要因素,并且驾驶人行为对安全驾驶起着主导性作用^[2-3]。驾驶人行为模型给出了驾驶人认知处理和行为操控的理论框架,对预测、减少驾驶风险,开发智能车辆,发展智能安全交通系统等有重大意义^[4]。由此可见,驾驶人行为模型日益成为交通领域的研究热点。

在过去几十年间,国内外许多研究人员都在传统、现代以及最新发展起来的控制系统理论上建立起了各具特色的驾驶人行为模型,如描述性模型和功能性模型。研究发现,驾驶人的性格、性别、驾龄、疲劳程度、驾驶经验等均会影响驾驶人行为^[5]。为了更好地研究和应用驾驶人行为模型,本文首先归纳总结了现有不同类型的驾驶人行为模型及建模思想,对其进行分类与阐述,并指出了它们之间的相互联系;其次,介绍了驾驶人行为模型的应用现状;最后,总结了驾驶人行为模型所面临的挑战及发展趋势。

1 驾驶人行为模型分类

驾驶人行为的建模思想一般是:在对驾驶活动(如驾驶人对速度的感知、决策过程以及驾驶人的注意力控制等)进行具体观察、分析和研究的基础上构建一个层级结构,然后将层级结构与驾驶任务动态地联系起来,在不同的层级上对驾驶人行为进行分析。一般来说,驾驶人行为模型的结构包含 3 个方面:输入、信息处理和驾驶人行为、输出,如图 1 所示^[6]。

驾驶人辅助系统的相关参数、周围车辆的行驶状态、道路状况、交通信号与车流信息等一般作为驾

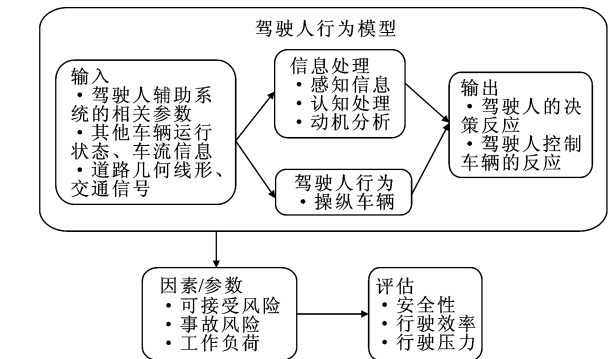


图 1 驾驶人行为模型的模块化结构

Fig.1 Modular structure of driver behavior model

驶人行为模型的输入,这些输入信号影响驾驶人的信息处理过程(如驾驶任务分配、风险感知等)与驾驶人行为,从而改变模型的输出即驾驶人的决策行为与控制车辆的反应。同时,可利用相关因素及参数指标对驾驶人行为进行评估。

本文根据 Michon 在 1985 年提出的驾驶人行为模型分类方法,以及近年来驾驶人行为模型的发展状况,将驾驶人行为模型分为描述性模型和功能性模型^[7]。描述性模型是指那些在静态层面对驾驶行为进行描述的模型,该类模型是比较简单的理论控制模型^[8]。功能性模型是在规划、决策和动机等微观层面对驾驶人行为进行分析,探索驾驶人的认知行为和主动适应性,该类模型是比较深层次的控制模型。根据驾驶人行为模型的分类,列举了具有代表性的驾驶人行为模型及相关模型的建立时间,见下页表 1。

2 描述性模型

描述性模型仅仅是对驾驶人行为进行简单的静态描述,其内部各子模块之间并没有动态交互,具有代表性的有任务分析模型、层级模型以及 Trait 模型等。

2.1 任务分析模型

任务分析实际上是对驾驶人在驾驶过程中的任务要求、行为要求和能力要求的客观描述与分析。

Hackman 于 1970 年提出一种任务分析方法,该方法从任务性质、行为要求、能力要求以及行为描述等 4 个方面对驾驶任务进行分析,基于该方法建

表 1 具有代表性的驾驶人行为模型

Tab. 1 Typical driver behavior models

| 分类 | 模型类型 | 代表性模型 |
|-------|-------------|---|
| 描述性模型 | 任务分析模型 | Hackman 模型(1970)、 McKnight 任务分析模型(1971)、 Fastenmeier 模型(2007) |
| | 层级模型 | Rasmussen 3 层级模型(1983)、 Michon 层级控制模型(1985)、 Hollnagel COCOM 模型(1993)、 Donges 3 层级模型(1999)、 GADGET 4 层级模型(2000)、 ECOM 模型(2004) |
| | Trait 模型 | Fleishman 的因子模型(1967)、 Michon Trait 模型(1985)、 统计模型(2007) |
| | 自适应控制模型 | 伺服控制模型和信息流控制模型(1985) |
| 功能性模型 | 基于计划行为理论的模型 | Ajzen 基于计划行为理论的模型(1991)、 丁靖艳侵犯驾驶行为预测模型(2006) |
| | 信息处理模型 | Wickens 四维多重资源模型(2002)、 Fuller 工作负荷模型(2005)、 Shinar 有限能力驾驶人信息处理模型(2007) |
| | 动机模型 | Wilde 基于风险平衡理论的模型(1982)、 Fuller 风险规避模型(1985)、 Summala 基于零风险理论的模型(1988)、 Rickard Nilsson 安全边界模型(2001)、 基于 BP 神经网络的风险预测模型(2013) |

立的驾驶任务分析模型可以对驾驶活动进行详尽地分类与描述^[9]。在 Hackman 的模型中,任务性质是指驾驶目标的任务属性及其物理性质;行为要求是指驾驶人结合具体的驾驶任务与其行为特征所规划的驾驶行为,该行为要求指引驾驶人行为;能力要求是指驾驶人具有与驾驶任务相关的驾驶技能、专业知识和心理素质;行为描述是指驾驶人完成驾驶任务时对驾驶行为的主观描述。

McKnight 等建立了含有 45 个主要驾驶任务的分析模型,该模型由 1 700 多个基本任务构建了一个详尽的驾驶任务库,为分析驾驶人行为奠定了基础^[10]。

Quenault 将任务分析模型与 Trait 模型结合起来开发了一种系统观测技术,并划分了 4 类驾驶人即安全驾驶人、非理性驾驶人、主动驾驶人和被动驾驶人,这种技术被用于驾驶人甄别方面^[11]。Fastenmeier 等利用任务分析模型归纳总结了 134 种道路交通情况(包括 99 种市区交通情况和 35 种高速公路交通情况),该道路交通情况常被用于多种项目研究,尤其是在高级驾驶人辅助系统方面^[12]。

任务分析模型可以作为功能性模型的低级别控制层(如策略、操作层),这类模型强调驾驶任务的重要作用,尤其在完成驾驶任务要求和驾驶人行为评估等方面。然而任务分析模型本身也有缺点,即该模型很少提及道路特征对驾驶任务的影响^[13]。

2.2 层级模型

层级模型的建模思想是:将各类驾驶子任务划分到不同层级上,在不同的层级上对驾驶任务进行分析。在层级模型中,各层级的任务要求、执行时间以及认知处理等均不相同。根据驾驶任务在时间层次和认知特征上的不同,以驾驶人行为为基础可构建出不同的层级模型,具有代表性的有 3 层级模型、层级控制模型、GADGET 层级模型、ECOM 模型(extended control model)等。

Rasmussen 于 1983 年提出基于认知、规则和技能之间差异的 3 层级模型^[14];Michon 于 1985 年将驾驶任务的影响因素与处理驾驶任务的方法结合起来建立了层级控制模型,该模型把驾驶任务细分为 3 个耦合层级:策略、操纵和控制^[7];Ranney 结合 Michon 层级控制模型和 Rasmussen 的 3 层级模型,描述了职业驾驶人与非职业驾驶人在执行不同操作时驾驶任务的层次结构变化情况^[15]。

Donges 于 1999 年在 Rasmussen 的 3 层级模型基础上对每个层级进行详细划分^[16],如下页图 2 所示。第 1 层级为基于技能的行为过程(控制层),驾驶人在该过程中运用熟练的驾驶技能自动处理驾驶任务且不需任何认知处理。第 2 层级为基于规则的行为过程(操纵层),驾驶人在该过程中根据交通规则要求和车辆当前的行驶状态确定任务指令(如超车、减速慢行、变换车道等)。第 3 层级为基于知识的行为过程(策略层),驾驶人在该过程中根据所掌握的交通知识和经验规划整个行驶过程并处理行驶过程中的突发事件。

在 Michon 层级控制模型的最高层级添加“行为层”之后,便形成了 GADGET 模型的 4 个层级^[7,17],如下页图 3 所示。策略层包括行程计划、路线选择和时间限制等,根据路线速度准则(如限速)该层会影响低层级的划分标准,该层的决策多发生在车辆行驶过程中(如超车、变换车道前)。在操纵层中,驾驶人与交通系统进行信息交互,驾驶人在该层需要对当前的驾驶环境快速地做出反应,其控制时间在 1 s 内。控制层是指驾驶人操纵车辆的过程(如速度、转向控制等),该层假设了各种并发驾驶行为之间的动态关系,其控制时间在 10⁻³ s 左右。

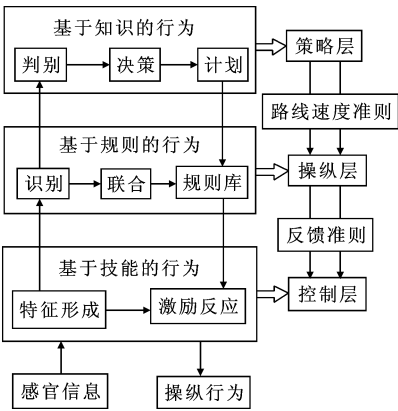


图 2 3 层级模型
Fig. 2 Three hierarchical model

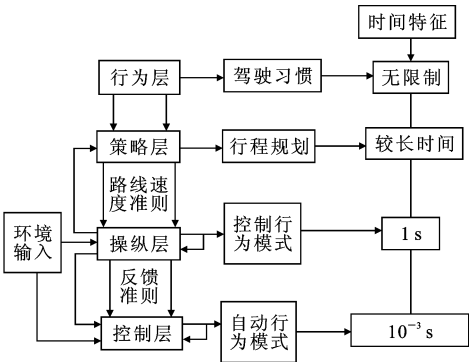


图 3 GADGET 模型的 4 个层级
Fig. 3 Four hierarchical structures of GADGET

GADGET 模型的 4 个层级可以对驾驶人的能力进行全面评价,尤其是在熟练驾驶人和新手驾驶人的能力评价和培训方面。

Hollnagel 在 1993 年提出了 COCOM 模型 (contextual control model),该模型只是简单描述了各控制层下的驾驶任务,并没有说明各控制层间的相互关系,因此难以描述多任务并发驾驶条件下的驾驶人行为特性^[18]。随后,Hollnagel 等在 COCOM 模型的基础上,将与驾驶相关的目标、动机放在控制理论的框架上建立了 ECOM 模型^[19-20]。ECOM 模型包含锁定、监控、校正和跟踪 4 个层级,其各层级功能特性如表 2 所示。ECOM 模型不但描述了驾驶人的行为特性、体现了其在执行不同驾驶任务时各层级间的动态交互,而且还为驾驶人行为与交通环境间的信息交互提供了合理解释。

2.3 Trait 模型

Trait 模型建立在具有事故倾向性的驾驶人基础上,该模型描述了驾驶人不同行为特征间的关系。从事故倾向性的角度来看,一些驾驶人由于生理、心理等因素容易发生交通事故,曾经发生过交通事故

表 2 ECOM 模型的各层级功能特性
Tab. 2 Functional characteristics in each hierarchy of ECOM

| 层次 | 控制目标 | 注意力要求 | 发生频率 | 持续时间 |
|-----|---------------|--------------------|-----------------|-----------|
| 锁定层 | 路线选择(正反馈) | 关注交通环境 | 少(行驶前) | 较长时间 |
| 监控层 | 驾驶状况(正反馈、负反馈) | 较少关注车辆、较多关注交通环境 | 间歇(车辆)、连续(交通环境) | 10 min 左右 |
| 校正层 | 预期风险(正反馈、负反馈) | 较多关注非正常驾驶、较少关注正常驾驶 | 频繁(市区)、较少(乡村) | 1 s~1 min |
| 跟踪层 | 补偿风险(负反馈) | 无要求 | 频繁 | <1 s |

的驾驶人与未曾发生过交通事故的驾驶人的心理特性不同,这对后续的驾驶行为会产生一定影响。车辆是定性系统,其许多方面都可以采用数学、力学以及动力学等方法来建立模型。然而驾驶人是非定性系统,包括外在差异(如驾驶技能、年龄、性别等)和内在差异(如疲劳程度、注意力、情绪等)。基于驾驶人的外在差异和内在差异,Trait 模型可分为因子模型、Michon Trait 模型以及统计模型等。

1967 年,Fleishman 基于驾驶人的感知、注意力以及驾驶技能的差异建立了因子模型,经验证驾驶人技能与车辆的一些基本特征(如行驶速度、空间位置等)相关^[21]。虽然 Fleishman 的因子模型可以很好地跟踪整个驾驶人学习过程,但该模型不能处理复杂的驾驶任务^[22]。

1985 年,Michon 基于事故发生频率建立了 Trait 模型,其理论思想是测量连续事故间的时间间隔。在 Michon Trait 模型中,驾驶人的内在差异和外在差异会改变连续事故间的时间间隔从而影响模型性能^[6]。

驾驶人的内在差异和外在差异也可采用统计模型来分析。建立统计模型常用的方法是探索因子分析法(exploratory factor analysis,EFA),其原理是利用变量间的相关性减少分析因子个数。EFA 方法被应用于交通事故预测、驾驶技能培训、驾驶习惯分析、疲劳驾驶研究等方面^[23-24]。除此之外,统计模型还采用多元相关统计方法,如验证性因子分析法(confirmatory factor analysis,CFA)和结构方程建模法(structural equation modeling,SEM),经验证采用这类方法可以更好地解释驾驶人与其行为间的关系^[25]。

近年来,统计模型和事故倾向理论的研究对 Trait 模型的发展起很大促进作用^[26]。Carsten 利用统计模型准确地描述了驾驶人在某一特定时刻的行为^[27]。Rothengatter 利用 Trait 模型研究驾驶人

的个体差异,这有助于提高驾驶人技能和防止交通事故发生^[28]。

3 功能性模型

功能性模型内部各模块之间存在着动态交互,此类模型从更深层面上分析了驾驶人行为。具有代表性的有自适应控制模型、基于计划行为理论的模式、信息处理模型以及动机模型等。

3.1 自适应控制模型

“自适应控制”最早是由 Wiener 和 Von Neumann 在 19 世纪提出的,之后其被广泛应用于车辆工程领域。自适应能力反映了驾驶人对车辆控制系统的理解,以及驾驶人在驾驶条件变化后能否快速做出反应的能力^[29]。自适应控制模型不但包括时域和频域内的微观模型和手动控制模型,还涵盖了对交通状况的模拟计算过程^[24]。自适应控制模型可分为伺服控制模型和信息流控制模型^[7]。自适应控制模型可以对测得的交通数据进行很好地拟合,但该模型不擅长预测驾驶人在某一特定时刻的行为,其常被用于驾驶人评估方面^[30]。

伺服控制模型的理论思想是:当车辆持续行驶时,驾驶人采取措施主动处理随时间变化的行驶信息(如车辆行驶速度)。伺服控制模型解释了驾驶人的预期和延迟反应,其常被用于车辆转向控制方面。郭孔辉等提出了驾驶人方向控制模型和驾驶人行为自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)算法,该算法可以在考虑汽车动力学系统强非线性特性的基础上实现车辆 ACC 控制^[31-33]。

在行车过程中,错综复杂的交通信息流是由驾驶人与车辆相互作用而产生的,因此,对驾驶人行为进行微观分析与建模可以再现并解释相应的交通信息流。信息流控制模型的建模思想是:利用计算机的计算模拟功能处理驾驶过程中的随机事件和突发风险。信息流控制模型被用于分析跟驰行为对交通流的影响^[24]。研究人员在跟驰模型中加入一些有关交通流基本特性的影响因素,建立了微观跟驰模型,该模型可以更好地解释实际交通流的复杂现象(迟滞现象、时走时停)^[34]。

2004 年, Sheridan 利用自适应控制模型分析了驾驶人注意力对驾驶人行为的影响,并简单地预测了驾驶人行为^[35]。鉴于驾驶过程中的大量随机因素,自适应控制模型难以准确地描述驾驶人在每一时刻的行为。自适应控制模型常被用于研究一些简单的驾驶任务,如车辆跟驰以及车辆在迎风条件下

的曲线行驶^[36-37]。

3.2 基于计划行为理论的模型

Ajzen 在 1980 年提出了理性行为理论(theory of reasoned action, TRA),该理论体现了评估驾驶人态度和行为的差异。TRA 理论中的行为是自发的,实际上驾驶人行为并不是 100% 自发或完全在控制之下。TRA 理论在扩充、完善后便是计划行为理论(theory of planned behavior, TPB)^[38]。

Ajzen 于 1991 年提出基于 TPB 的驾驶人行为模型(简称 TPB 模型),该模型结构如图 4 所示。TPB 模型能够校正驾驶人行为,并预测驾驶人在某一特定时刻的行为。在 TPB 模型中,实际驾驶行为的形成过程分为 3 个阶段:(1)外生变量(驾驶人性格、驾驶技能、经验等)决定驾驶人的行为态度、主观规范及知觉行为控制;(2)驾驶人的行为态度、主观规范与知觉行为控制相互作用共同决定驾驶人的行为意向;(3)驾驶人的行为意向和对驾驶任务的知觉行为控制决定驾驶人的实际驾驶行为。

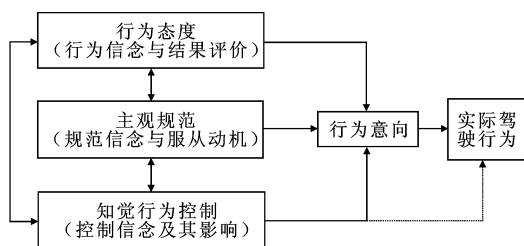


图 4 基于 TPB 的模型

Fig. 4 Model based on theory of planned behavior

影响交通安全的因素有环境因素(如道路条件、交通标志等)和交通管理因素(执法规范性、对交通流量的实时控制与调度等)。在这些影响交通安全的各因素方面,中国与西方国家之间存在显著差异。有关研究人员利用 TPB 理论框架探究了中国交通背景下的驾驶人行为。丁靖艳等以 TPB 理论为基础建立了侵犯驾驶行为预测模型,结果表明中国驾驶人的态度、主观规范和知觉行为控制等通过行为意向的中介可对侵犯驾驶行为进行有效预测^[39-40]。此外,研究人员在分析中国交通环境的基础上,以 TPB 理论为基础建立了驾驶行为预测模型,研究结果表明,驾驶人的态度和控制策略对危险驾驶行为(如违规、疏忽失误和危险性错误)的影响较大。

TPB 模型在驾驶领域得到了广泛应用,尤其在研究酒后驾驶、超车、超速以及攻击性驾驶行为等方面^[40-41]。Leandro 利用 TPB 模型将青年驾驶人的态度、驾驶规范和行为感知联系在一起,预测了车辆

的合理行驶速度^[42]。然而,TPB 模型本身也有缺陷,它能解释理性的、由意向控制的驾驶行为,对驾驶人的情绪、驾驶习惯、驾驶人的个体差异等引起的非正常驾驶行为并不能给出合理解释。

3.3 信息处理模型

在驾驶过程中,信息是动态变化的,其不断地被接受、判断与处理。驾驶人需要综合认知、判断与决策等,时刻保持驾驶人与车辆、道路间的信息交流,因此驾驶过程也是不断进行信息处理的循环过程。信息处理模型的建模思想是:人类认知可以在思维逻辑相互独立的计算步骤上建立模型,一般包括感知、决策和反应选择等步骤,同时也可对驾驶人的注意力和生理机能的局限性进行建模。比较有代表性的信息处理模型有基于多重资源理论的模型、工作负荷模型和有限能力的驾驶人信息处理模型等。

驾驶人信息处理过程包括对不同驾驶任务之间干扰的研究,其理论基础是多重资源理论^[43]。2002年,Wickens 基于该理论提出了由相关需求、资源重叠、分配策略和驾驶任务构成的四维多重资源模型,该模型解释了任务干扰与驾驶人大脑协作之间的关系,如图 5 所示^[44]。四维多重资源模型分为过程、规则、形态和视觉处理 4 个维度,这种维度划分可以更好地对驾驶任务进行规划和资源分配。过程维度表示那些潜意识的动作、知觉和认知任务。规则维度表示空间活动中采用不同资源表达感知、记录驾驶信息的活动,主要采用动作和语言进行记录。形态维度表示采用不同资源对驾驶信息进行听觉感知和视觉感知。视觉处理维度嵌套在视觉资源上,该维度用以区分外部和内部视野,内部视野主要负责对象识别(例如阅读和识别标志),外部视野主要负责感知车辆行驶方向和驾驶任务(例如车道保持)。

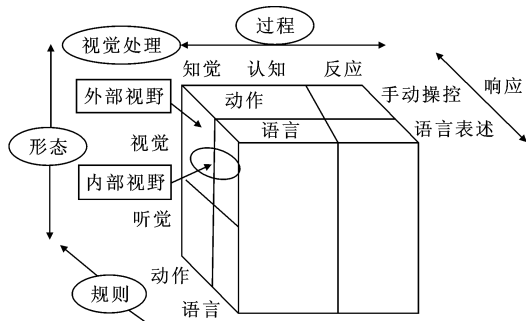


图 5 四维多重资源模型

Fig. 5 4-D multiple resource model

在行车过程中,驾驶人不但要处理驾驶任务之间的干扰,而且要承担相应的驾驶工作负荷。驾驶

工作负荷是指驾驶人在道路、交通和环境对其影响下的信息处理能力,主要是指驾驶人的心理负荷。若驾驶人处理的信息量过大,驾驶人的工作负荷则会升高。当较高驾驶工作负荷持续存在时,驾驶人判断、决策和操纵失误的几率就会增大^[45]。在对驾驶任务与驾驶能力进行分析的基础上,Fuller 于 2005 年提出了驾驶人工作负荷模型,该模型力图使驾驶人在驾驶行为需求层上的工作负荷最小^[46]。

在行车过程中,驾驶人需要面对大量信息快速地进行处理,然而在同一时间内,驾驶人的大脑只能处理有限信息。2007年,Shinar 基于驾驶人有限的信息处理能力和认知能力提出了有限能力的驾驶人信息处理模型,该模型在添加了车辆动力学反馈后能更加准确地描述驾驶人在驾驶时的信息处理过程,如图6所示^[47]。经验证,采用信息处理模型可避免遗漏某些信息而产生错误认知,同时构建认知体系可把高层级的认知和决策过程转移到低层级的感知控制过程中,从而避免交通事故的发生^[-48]。

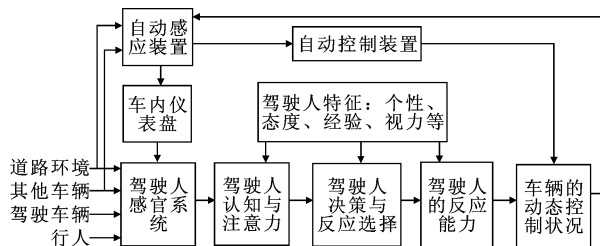


图 6 有限能力的驾驶人信息处理过程模型

Fig. 6 Limited-capacity model of driver information process

信息处理模型强调驾驶人信息处理的有限性,并且有些信息处理模型并没有包含到大多数通用的驾驶人行为模型中^[49-50]。因此,信息处理模型常被用来研究驾驶人由次要驾驶任务引起的注意力分散(如在驾驶过程中使用手机)等风险行为^[51-52]。在信息处理模型中,驾驶人作为被动信息接收器,很难主动管理和控制交通状况,而动机模型的出现则改善了信息处理模型这一缺点。

3.4 动机模型

动机模型描述了驾驶人在主动控制风险方面的行为^[7]。与信息处理模型相比,动机模型强调驾驶人的自我调节能力和驾驶人在不同交通状况下的动态适应性。现有动机模型间的差别主要在于控制适应性的标准不同,其中有采用定量标准的安全边界模型和采用定性标准(如风险水平或任务难度)的风险模型。风险模型依据风险理论的不同,可划分为基于风险平衡理论(risk homeostasis theory, RHT)

的模型、基于零风险理论的模型、风险规避模型和风险预测模型等。

Gibson 等在 1938 年解释了驾驶时的“安全边界”概念,并指出驾驶人旨在保持一个“安全驾驶领域”,即驾驶人视野里的障碍和风险均在该领域之外^[53]。安全边界是一个相当抽象的概念,很难给出具体的驾驶人心理安全边界范围。随着技术的发展和相关理论的提出,安全边界已发展成具体的、可测量的安全边界参数^[54]。2001 年,Nilsson 基于安全边界参数(速度、时间、距离等安全阈值)建立了安全边界模型,经验证在安全阈值范围内驾驶人可以高效、安全驾驶,若超过此阈值范围,驾驶人则不可避免地发生危险或与其他车辆发生冲突^[55]。Lee 把与时间相关的、直接观测的安全边界参数(知觉变量)应用到驾驶人的制动行为模型中,并讨论了车辆安全行驶距离与行驶速度之间的关系^[56]。有些研究人员将安全边界模型用于驾驶人车道变换控制行为中,研究结果表明,驾驶人的转向动作更加可靠、灵敏^[57]。

在驾驶过程中,驾驶人通过知觉、认知和动机处理等协调自身行为,适应驾驶风险。1982 年,Wilde 通过分析驾驶风险提出了基于风险平衡理论的模型,该模型认为驾驶人倾向于保持一个可以接受的风险水平,驾驶人通过协调自身行为,始终保持着该风险水平,经验证,事故发生率与驾驶人可接受的风险水平相关^[58]。此外,Summala 于 1988 年提出了基于零风险理论的模型,该模型认为驾驶人将主观感知的风险保持在零水平^[59-60]。

然而,基于风险平衡理论的模型和基于零风险理论的模型都存在着一定的目标风险^[6]。Fuller 结合安全边界模型给出相关解释,于 1985 年提出了风险规避模型。该模型指出驾驶人行为是受风险回避引导的,如图 7 所示^[61]。在风险规避模型中,驾驶人试图通过协调驾驶任务(车速与路径控制)与驾驶技能之间的关系保持一定的任务难度。当任务需求超出驾驶人的能力范围时,驾驶人对即将到来的风险会产生辨别性的或无辨别性的激励。如果是辨别性的激励(可控事件),驾驶人会主观地预测风险,通过判断驾驶动机,选择回避风险或者消除风险;如果是无辨别性激励(不可控事件),那么驾驶人不能成功地回避风险。实际上驾驶人总是尽最大努力、最快地消除风险,但并不是所有的风险都是突发的,在这种情况下,驾驶人要么成功地协调驾驶任务与驾驶技能之间的关系回避风险,要么就会引发交通事

故^[24]。在风险规避模型的基础上,Fuller 于 2005 年建立了 TCI(task capability interface)模型,该模型进一步分析了驾驶人行为在资源分配、层级决策、驾驶要求与驾驶技能等方面的影响^[46]。

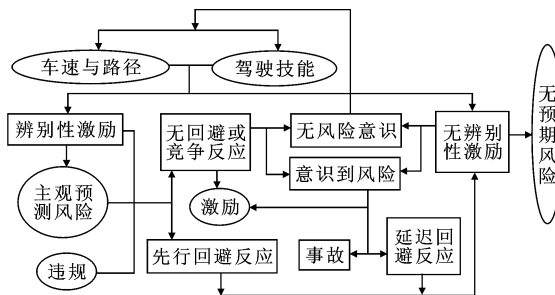


图 7 Fuller 的风险规避模型

Fig. 7 Risk avoidance model of Fuller

此后,风险模型得到了进一步发展,Ou 等分析了驾驶任务并基于 BP 神经网络建立了风险预测模型^[62]。通过改变风险预测模型的输入(驾驶人情绪、动机以及天气状况),可以预测相应的驾驶风险,经验证,这种预测模型的精确度高达 60%。

Vaa 等结合躯体标识假设与动机模型分析了驾驶人行为,于 2011 年提出驾驶人行为主要是受风险状况下的情绪反应支配,并强调了驾驶人的情绪反应对驾驶过程(如酒后驾驶和攻击性驾驶等)的干扰作用^[63-65]。尽管动机模型在研究驾驶人的心理因素对驾驶行为的影响方面很有价值,但因其缺乏严谨的数据而遭到质疑。在动机模型中,驾驶人的行为控制取决于他们可以接受的风险水平,然而这种风险的起因和影响因素在动机模型中则很少涉及^[5]。

4 应用现状

驾驶人行为模型得到越来越广泛的应用,其主要表现在以下几个方面。

(1) 驾驶人培训和评价方面。欧盟开发的 GADGET 模型主要用于驾驶人的培训和再教育,GADGET 模型矩阵与驾驶人的事故分析、非职业驾驶人等相关,不同需求产生不同层次的 GADGET 矩阵,其被用于多媒体工具和驾驶模拟器中。GADGET 模型有 4 个层次^[66],具体如下页表 3 所示。

在大多数国家的交通事故统计中,新手驾驶人发生交通事故的比例很大,这是因为熟练驾驶人与新手驾驶人的驾驶经验不同,从而导致信息处理的优先次序和效率不同^[67-69]。由此建立与经验、年龄

表 3 GADGET 模型的 4 个层次
Tab. 3 Four levels of GADGET model

| 分类 | | 知识和技能 | 风险增长因素 | 自我评价 |
|---|-------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|
| 驾 驶 行 为 的 分 层 水 平 | 驾驶习惯 和技能 | 意识相关: 驾驶技能、生活习惯、 驾驶规范、动机等 | 风险相关: 可接受的风险、承受的 社会压力、酒后驾驶 | 意识相关: 激励控制、风险趋势 危险动机、冒险习惯 |
| | 驾驶目的 和环境 | 意识相关: 驾驶目的地、计划和路线 选择、车内乘客的影响 | 风险相关: 身体状况(舒适性、清醒性)、 道路环境、驾驶人与乘客的关系 | 意识相关: 个人计划能力、选择的驾驶 目的地、选择的驾驶模型 |
| | 交通掌握 情况 | 理论相关: 交通规则、交通标志、 风险界限 | 风险相关: 错误估计、违规、不平常 驾驶情形、无驾驶经验 | 意识相关: 驾驶技能、主观风险 水平、主观风险界限 |
| | 车辆操纵 | 技能相关: 车辆的直接控制和所处 地理位置、车辆性能 | 风险相关: 车辆行驶环境(气候、地面摩擦等)、 车辆状况(轮胎、发动机等) | 意识相关: 车辆控制中的优缺点 |

相关的 GADGET 矩阵可以对驾驶人的能力进行有效评估,这些研究多用于熟练驾驶人和新手驾驶人的能力评价和培训方面。

(2)安全设施效用评价方面。驾驶人行为模型在安全带以及摩托车头盔的有效评价等方面得到广泛应用,在防滑轮胎评价方面尤为突出^[70]。研究结果表明,在冰雪路面上,装备防滑轮胎的驾驶人倾向于采用更高的速度驶过弯道,这常被作为行为适应性和风险补偿驾驶行为模型应用的例子^[71]。驾驶人行为模型也常用于 ABS、ESP、ACC 等安全设备方面的研究,还可对驾驶人的疲劳状态进行检测预警,其常被应用于车道偏离预警系统^[72]。此外,驾驶人行为模型在人车交互方面的应用也越来越多,包括辅助驾驶功能(如制动防抱死系统、碰撞警告系统、自适应巡航系统)和非驾驶功能(通讯和娱乐功能)的应用等。

(3)高级驾驶人辅助系统(advanced driver as-sistance system,ADAS)设计和评价方面的应用。一些研究分析了车辆辅助驾驶系统对驾驶人行为的影响,如驾驶人的行为适应性,以及 ADAS 降低驾驶人工作负荷后带来的行程速度提高等问题。Bekiaris 等基于驾驶人行为建立了 DRIVABILITY 模型,该模型被用于设计 ADAS 的警告等级与策略,以及驾驶人培训与评估等方面^[73]。此外,AIDE IP 模型根据驾驶人执行的一系列操作来假设驾驶行为^[74],该模型考虑到驾驶活动的动态特性,认为驾驶人行为由感知、处理、规划、执行构成,其常被用于高级驾驶人辅助系统中个性化人机界面的研究^[75-76]。

5 结 语

(1)影响驾驶行为的因素有很多,既有自身因素(如驾驶人复杂的心理认知过程、驾驶习惯),也有外界因素(如交通环境与车辆本身属性)。复杂的交通环境会影响驾驶人的心理认知过程,进而影响驾驶人行为。目前,关于交通环境、驾驶习惯、车辆类型对驾驶人行为影响的研究较少。此外,中国的驾驶环境与其他国家相比有很大差异,国外大多数驾驶人行为模型并不能直接在中国得以应用,因此,结合具体驾驶环境、驾驶习惯、车辆类型等构建合理的驾驶人行为模型,是研究驾驶人行为的一个重要方向。

(2)驾驶人行为复杂多变,其行为特征很难具体地被全部概括出来。大多数现有模型仅能从某些角度解释驾驶人行为,难以概括出驾驶人的全部行为特征。各类模型还有待深入研究与完善拓展。在研究现有模型的基础上,借助其他领域的相关技术(如通信技术、车联网技术等),以心理学、人机工程学、交通工程学以及控制理论等为基础构建出功能强大的整合模型,这也是驾驶人行为模型研究的一个重要方向。

(3)中国在驾驶人行为模型方面的研究起步较晚,相关研究成果大都停留在理论层面上,还缺乏严谨的试验数据支撑。与驾驶行为相关的数据采集与分析处理工作也尤为不足,降低了模型的仿真精度,限制了驾驶人行为模型在中国的实际应用。借助各类检测设备与采集仪器获取试验数据,对模型进行验证,提高模型精度,成为驾驶人行为模型的突破难点。

(4)驾驶人行为模型在人车路系统研究中具有

重要作用。由于车辆智能化、道路信息化水平的提高,未来的交通将面临更为复杂的环境,呈现出自动化、智能化的发展趋势,驾驶人行为模型在车辆开发、交通仿真、车路协同、道路安全评价等方面的应用面临着更为严峻的技术挑战。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国公安部. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]. 北京: 中华人民共和国公安部, 2012.
The Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Annual report for road traffic accident [R]. Beijing: The Ministry of Public Security of the People's Republic of China, 2012. (in Chinese)
- [2] LEE J D. Fifty years of driving safety research[J]. *Human Factors*, 2008, 50(3): 521-528.
- [3] ZHANG W, HUANG Y H, ROETTING M, et al. Driver's views and behaviors about safety in China: what do they not know about driving? [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38(1): 22-27.
- [4] 任晓明, 薛青, 郑长伟, 等. 驾驶员状态模型研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1993-1998.
REN Xiao-ming, XUE Qing, ZHENG Chang-wei, et al. Research of driver's state model[J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(9): 1993-1998. (in Chinese)
- [5] 冯忠祥, 刘静, 李阳阳, 等. 攻击性驾驶行为选择模型及影响因素敏感度分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 106-112.
FENG Zhong-xiang, LIU Jing, LI Yang-yang, et al. Selected model and sensitivity analysis of aggressive driving behavior[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(2): 106-112. (in Chinese)
- [6] CODY D, TAN S, CAIRD J K, et al. The naturalistic driver model: development, integration, and verification of lane change maneuver, driver emergency and impairment modules[R]. Berkeley: University of California, 2008.
- [7] MICHON J A. A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? [C]// Springer. *Human Behavior and Traffic Safety*. New York: Springer, 1985: 485-524.
- [8] 段冀阳, 李志忠. 驾驶行为模型的研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 30-36.
DUAN Ji-yang, LI Zhi-zhong. A review on driving behavior models[J]. *China Safety Science Journal*, 2012, 22(2): 30-36. (in Chinese)
- [9] HACKMAN J R, MCGRATH J E. Tasks and task performance in research on stress[M]. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1970.
- [10] MCKNIGHT A J, ADAMS B B. Driver education task analysis[M]. Alexandria: Human Research Organization, 1970.
- [11] QUENAULT S W. Driver behavior, safe and unsafe drivers[R]. Crowthorne: Transportation and Road Research Laboratory, 1968.
- [12] FASTENMEIER W, GSTALTER H. Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice[J]. *Safety Science*, 2007, 45(9): 952-979.
- [13] PIECHULLA W, MAYSER C, GEHRKE H, et al. Reducing drivers' mental workload by means of an adaptive man-machine interface[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2003, 6(4): 233-248.
- [14] RASMUSSEN J. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1983, 13(3): 257-266.
- [15] RANNEY T A. Models of driving behavior: a review of their evolution[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 1994, 26(6): 733-750.
- [16] DONGES E. A conceptual framework for active safety in road traffic[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 32(2/3): 113-128.
- [17] CHRIST R. GADGET final report: investigations on influences upon driver behavior-safety approaches in comparison and combination [R]. Wien: GADGET Consortium, 2000.
- [18] HOLLNAGEL E. Human reliability analysis: context and control[M]. London: Academic Press, 1993.
- [19] HOLLNAGEL E, NABO A, LAU I. A systemic model for driver-in-control[C]//The University of Iowa. *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*. Iowa City: The University of Iowa, 2003: 86-91.
- [20] HOLLNAGEL E, WOODS D D. Joint cognitive systems: foundations of cognitive systems engineering [M]. Oxfordshire: Taylor & Francis Group, 2005.
- [21] FLEISHMAN E A. Performance assessment based on an empirically derived task taxonomy[J]. *Human Factors*, 1967, 9(4): 349-366.
- [22] FLEISHMAN E A. Toward a taxonomy of human performance [J]. *American Psychologist*, 1975, 30(12): 1127-1149.
- [23] WINTER J C E D, DODOU D. The driver behavior questionnaire as a predictor of accidents: a meta-a-

- analysis[J]. Journal of Safety Research, 2010, 41(6): 463-470.
- [24] PELSMACKER P D, JANSSENS W. The effect of norms, attitudes and habits on speeding behavior: scale development and model building and estimation [J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(1): 6-15.
- [25] WINTER J C F D, HAPPEE R. Modeling driver behavior: a rational for multivariate statistics[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2012, 13(5): 528-545.
- [26] WAHLBERG A, DORN L. Bus driver accident record: the return of accident proneness[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2009, 10(1): 77-91.
- [27] CARSTEN O. From driver models to modeling the driver what do we really need to know about the driver? [C]//Springer. Modeling Driver Behavior in Automotive Environments. London: Springer, 2007: 105-120.
- [28] ROTHENGATTER T. Drivers' illusions-no more risk [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2002, 5(4): 249-258.
- [29] MACADAM C C. Understanding and modeling the human driver[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1-3): 101-134.
- [30] BOER E R, WARD N J, MANSER M P, et al. Driver performance assessment with a car following model [C]//The University of Iowa. Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Iowa City: The University of Iowa, 2005: 433-440.
- [31] 高振海, 管欣, 郭孔辉. 驾驶员方向控制模型及在汽车智能驾驶研究中的应用[J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 106-109.
- GAO Zhen-hai, GUAN Xin, GUO Kong-hui. Driver directional control model and the application in the research of intelligent vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 106-109. (in Chinese)
- [32] 郭孔辉, 潘峰, 马凤军. 预瞄优化神经网络驾驶员模型[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 26-28, 64.
- GUO Kong-hui, PAN Feng, MA Feng-jun. Preview optimized artificial neural network driver model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 26-28, 64. (in Chinese)
- [33] 管欣, 王景武, 高振海, 等. 基于驾驶员行为模拟的ACC控制算法[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 205-209.
- GUAN Xin, WANG Jing-wu, GAO Zhen-hai, et al. An ACC control algorithm based on driver behavior model[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(2): 205-209. (in Chinese)
- [34] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: a historical review[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 1999, 2(4): 181-196.
- [35] SHERIDAN T B. Driver distraction from a control theory perspective[J]. Human Factors, 2004, 46(4): 587-599.
- [36] ALLEN R W, MARCOTTE T D, ROSENTHAL T J, et al. Driver assessment with measures of continuous control behavior [C]//The University of Iowa. Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Iowa City: The University of Iowa, 2005: 165-172.
- [37] BOER E R, WARD N J, MANSER N P, et al. Driver performance assessment with a car following model [C]//The University of Iowa. Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Iowa City: The University of Iowa, 2005: 433-440.
- [38] AJZEN I. The theory of planned behavior[J]. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 1991, 50(2): 179-211.
- [39] 丁靖艳. 基于计划行为理论的侵犯驾驶行为研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(12): 15-18.
- DING Jing-yan. Study on the aggressive driving behavior based on theory of planned behavior[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(12): 15-18. (in Chinese)
- [40] 张凤, 李永娟, 蒋丽. 驾驶行为理论模型研究概述[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2): 23-28.
- ZHANG Feng, LI Yong-juan, JIANG Li. Overview on theoretical models of driving behaviors [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(2): 23-28. (in Chinese)
- [41] CHAN D C N, WU A M S, HUNG E P W. Invulnerability and the intention to drink and drive: an application of the theory of planned behavior[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(6): 1549-1555.
- [42] LEANDRO M. Young drivers and speed selection: a model guided by the theory of planned behavior[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior, 2012, 15(3): 219-233.
- [43] WICKENS C D. Multiple resources and performance prediction[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2002, 3(2): 159-177.
- [44] WICKENS C D. Multiple resources and mental work-

- load[J]. *Human Factors*, 2008, 50(3): 449-455.
- [45] WILSON G F. An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measure[J]. *International Journal of Aviation Psychology*, 2002, 12(1): 3-18.
- [46] FULLER R. Towards a general theory of driver behavior[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2005, 37(3): 461-472.
- [47] SHINAR D. *Traffic safety and human behavior*[M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2007.
- [48] 刘雁飞, 吴朝晖. 驾驶 ACT-R 认知行为建模[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(10): 1657-1662.
LIU Yan-fei, WU Zhao-hui. Driver behavior modeling in ACT-R cognitive architecture[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2006, 40(10): 1657-1662. (in Chinese)
- [49] SHINAR D. Traffic safety and individual differences in drivers' attention and information processing capacity[J]. *Alcohol, Drugs, and Driving: Abstracts and Reviews*, 1970, 9(4): 219-237.
- [50] SALVUCCI D D. Predicting the effects of in-car interface use on driver performance: an integrated model approach[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2001, 55(1): 85-107.
- [51] KASS S J, COLE K S, STANNY C J. Effects of distraction and experience on situation awareness and simulated driving[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2007, 10(4): 321-329.
- [52] LAMBLE D, KAURANEN T, LAAKSO M, et al. Cognitive load and detection thresholds in car following situations: safety implications for using mobile (cellular) telephones while driving[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 1999, 31(6): 617-623.
- [53] GIBSON J J, CROOKS L E. A theoretical field-analysis of automobile-driving[J]. *The American Journal of Psychology*, 1938, 51(3): 453-471.
- [54] GIBSON J J. *The ecological approach to visual perception*[M]. London: Psychology Press, 1986.
- [55] NILSSON R. *Safety margins in the driver*[D]. Uppsala: Uppsala University, 2001.
- [56] LEE D N. A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision[J]. *Perception*, 1976, 5(4): 437-459.
- [57] VAN WINSUM W, DE WAARD D, BROOKHUIS K A. Lane change manoeuvres and safety margins[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 1999, 2(3): 139-149.
- [58] WILDE G J S. A theory of risk homeostasis: implications for safety and health[J]. *Risk Analysis*, 2006, 2(4): 209-225.
- [59] SUMMALA H. *Modeling driver behavior: a pessimistic prediction*[C]//Springer. *Human Behavior and Traffic Safety*. New York: Springer, 1986: 43-65.
- [60] SUMMALA H. Risk control is not risk adjustment: the zero-risk theory of driver behavior and its implications[J]. *Ergonomics*, 1988, 31(4): 491-506.
- [61] FULLER R. A conceptualization of driving behavior as threat avoidance[J]. *Ergonomics*, 1984, 27(11): 1139-1155.
- [62] OU Y K, LIU Y C, SHIH F Y. Risk prediction model for drivers' in-vehicle activities application of task analysis and back propagation neural network[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 2013, 18(2): 83-93.
- [63] VAA T. *Drivers' information processing, decision-making and the role of emotions: predictions of the risk monitor model*[C]//Springer. *Human Modeling in Assisted Transportation*. Milan: Springer, 2011: 23-32.
- [64] DAMASIO A R. *Descartes' error: emotion reason and the human brain*[M]. New York: Avon Book, 1994.
- [65] 庄明科, 白海峰, 谢晓飞. 驾驶人员风险驾驶行为分析及相关因素研究[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2008, 44(3): 475-482.
ZHUANG Ming-ke, BAI Hai-feng, XIE Xiao-fei. A study on risky driving behavior and related factors[J]. *Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis*, 2008, 44(3): 475-482. (in Chinese)
- [66] SIEGRIST S. *Driver training testing and licensing: towards theory based management of young drivers' injury risk in road traffic: results of EU-Project GADGET, work package 3*[R]. Berne: Accident Prevention BFU, 1999.
- [67] MCCARTT A T, SHABANOVA V I, LEAF W A. Driving experience, crashes and traffic citations of teenage beginning drivers[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, 35(3): 311-320.
- [68] MAYHEW D R, SIMPOTIION H M, PAK A. Changes in collision rates among novice drivers during the first months of driving[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2003, 35(5): 683-691.
- [69] 郭应时, 马 勇, 付 锐, 等. 汽车驾驶人经验对注视行为特性的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2012, 12(5): 91-99.
GUO Ying-shi, MA Yong, FU Rui, et al. Influence of driving experience on gazing behavior characteristic for car driver[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(5): 91-99. (in Chinese)