

# 自然驾驶工况的驾驶员紧急转向变道行为

吴 斌<sup>1,2</sup>, 朱西产<sup>1</sup>, 沈剑平<sup>2</sup>, 李 霖<sup>3</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 国家机动车产品质量监督检验中心(上海), 上海 201805;

3. 上海国际汽车城(集团)有限公司, 上海 201804)

**摘要:** 基于中国自然驾驶工况数据, 提出了紧急工况下驾驶员转向变道行为的特征规律. 分析了紧急转向变道避撞、侧移和稳定阶段的驾驶员转向特征, 研究了转向持续时间、方向盘转速和转角的线性关系, 定义了用高斯函数拟合的转向基元来表征各阶段的转向行为. 研究表明, 转向基元表征了驾驶员转向行为的一般特征, 单个转向基元的方向盘最高转速和转角变化线性相关, 持续时间恒定, 符合人体行为学中趋向行为(reaching behavior)的特征规律. 驾驶员的紧急转向变道行为是由多个转向基元组合而成, 每个转向基元都是一个开环模型, 可通过方向盘最高转速预判驾驶员的转向行为.

**关键词:** 自然驾驶工况; 紧急变道; 转向; 驾驶行为

**中图分类号:** U46

**文献标志码:** A

## Analysis of Driver Emergency Steering Lane Changing Behavior Based on Naturalistic Driving Data

WU Bin<sup>1,2</sup>, ZHU Xichan<sup>1</sup>, SHEN Jianping<sup>2</sup>, LI Lin<sup>3</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. National Center of Supervision and Inspection on Motor Vehicle Products Quality (Shanghai), Shanghai 201805, China; 3. Shanghai International Automobile City (Group) Co., Ltd., Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The general characteristics of driver emergency steering lane change behaviors based on the China naturalistic driving data were proposed in this paper. The emergency steering characteristic was analyzed respectively in collision avoidance, lateral movement and steering stabilization phases, focusing on the steering duration time, the relationship between steering wheel rate and steering wheel deflection. The steering behaviors in three phases were described by using the steering primitive fitting by Gaussian function. The research results show that the steering

primitive represents the general characteristics of driver steering behaviors. A linear relationship was found between the maximum steering wheel rate and the steering wheel deflection, and the steering time for a single steering primitive is constant. The driver emergency steering behaviors follow the characteristics of the reaching behavior. The driving emergency steering lane change is composed of steering primitives, while the single steering primitive is an open-control model, which indicates that the steering angle is predetermined using the maximum steering wheel rate.

**Key words:** naturalistic driving data; emergency lane change; steering; driver behavior

研究紧急工况下驾驶员行为是开发先进驾驶辅助系统(advanced driver assistant systems, ADAS)的前提. 在紧急工况下驾驶员存在制动和转向两种避撞行为<sup>[1]</sup>. 相对于制动避撞, 紧急变道避撞在高相对速度、低附着系数、低重叠率等工况下所需的纵向距离更小, 避撞效能更高<sup>[2-4]</sup>; 但紧急转向变道是驾驶员容易操作失误从而引发交通事故的一种驾驶行为. 目前国际上已经开始了对紧急转向变道技术的研究<sup>[1,5]</sup>, 但对于紧急工况下的转向变道行为特征的深入研究还比较少.

有关紧急工况下驾驶员转向变道方面的研究, 主要集中在转向的动力学控制和整体的转向行为特征分析. 在转向动力学控制方面, 对于驾驶员转向行为往往是通过简化模型的方式来处理. Lee 等<sup>[6]</sup>利用正弦函数对驾驶员变道行为进行建模, 并利用该模型对驾驶员的紧急转向控制进行研究. Highway 等<sup>[7]</sup>利用正弦函数和梯形公式对交通事故中的转向变道行为进行了建模, 并认为用简化模型来拟合驾驶员转向的过程非常困难. Nelson<sup>[8]</sup>和

收稿日期: 2016-05-26

基金项目: 上海市科委研发平台项目(16DZ2291000)

第一作者: 吴 斌(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为先进驾驶辅助系统. E-mail: binw@smvic.com.cn

通讯作者: 朱西产(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车主、被动安全. E-mail: xczechu@163.com

Papadimitriou 等<sup>[9]</sup>的研究简化了驾驶员的转向行为,选择利用五次多项式生成变道轨迹。Bascunana<sup>[10]</sup>讨论了安全变道与不安全变道工况,并使用正弦函数对驾驶员变道行为进行描述。利用简化模型对驾驶员转向行为进行建模有一定的局限性,紧急转向变道工况的驾驶员方向盘转角曲线并不对称,且方向盘转速各个阶段的特征各不相同,用正弦函数、多项式或梯形函数并不能还原真实的紧急工况下的驾驶员转向行为特征。在紧急转向变道的行为特征研究方面,Salvucci 等<sup>[11]</sup>分别利用硬件在环和驾驶模拟器仿真实验的方法对紧急变道驾驶行为的特征进行了整体的分析,并利用场地实车实验所收集的数据分析了紧急变道转向行为中的转向持续时间、侧向加速度和方向盘转角的特征;Benderius 等<sup>[12-14]</sup>研究了方向盘最高转速和最大转角之间的线性关系,但并未考虑紧急转向变道工况。目前对紧急工况下转向变道行为的研究,往往是在整体上对转向的持续时间和特征进行分析,并未详细分析紧急转向变道各个阶段的不同特征,也未针对紧急变道过程中的各阶段的方向盘转速和转角变化的关系进行深入研究。

本文基于中国自然驾驶工况数据,筛选了紧急转向变道工况,并将驾驶员的紧急变道转向进行了3个阶段的划分:避撞、侧移和稳定阶段。定义了用高斯函数拟合的转向基元来表征驾驶员转向的一般特征,并基于此对紧急转向变道3个阶段的转向行为进行了研究,分阶段分析了转向持续时间的分布、方向盘转速和转角的关系。

## 1 自然驾驶工况的数据采集和筛选

为了研究驾驶员在真实交通环境中的驾驶行为,本文所使用的数据全部来自中国大型实车路试(China Field Operational Test, China FOT)的先行实验 China-Pilot FOT。所有实验车都统一安装了针对本实验所设计的数据采集设备,包括4个摄像头以及1个眼动仪。4个摄像头的视角分别为脚踏板、驾驶员座椅、车辆前方、车辆后方,用以全面记录驾驶过程中驾驶员操作信息和道路环境信息,如图1所示。为期2个月的数据采集中,实验车辆共行驶了3 788 km,收集了来自不同驾驶员的160个驾驶片段,得到5 600 min的自然驾驶数据。

在紧急转向变道工况中驾驶员的方向盘转速和TTC(time to collision)值是衡量变道过程是否紧急

的重要因素。当 $TTC < 2.0$  s,且两车相对速度大于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,驾驶员更易以转向变道的方式来避免碰撞的发生,并伴随较大的方向盘转速<sup>[15-16]</sup>。本文参考国外研究,将最大方向盘转速 $\dot{\delta}_m > 50 (\text{°}) \cdot \text{s}^{-1}$ , $TTC < 2.0$  s作为判定驾驶员是否采取紧急变道转向的筛选条件<sup>[17]</sup>。结合CAN总线所记录的驾驶数据和摄像头采集的视频数据,从5 600 min的数据中通过分析得到符合紧急变道条件的工况共有33例。

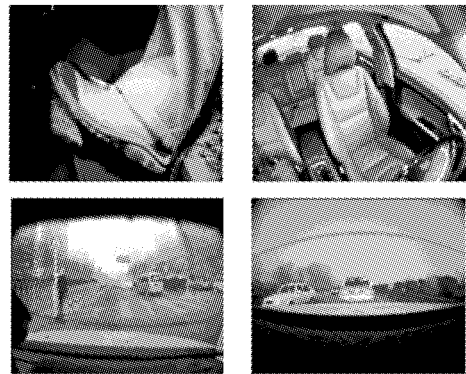


图1 自然驾驶工况采集中的摄像头视角

Fig.1 Imaging view of cameras in naturalistic driving data

## 2 紧急转向变道的阶段划分

图2为紧急变道工况的方向盘转角和转速变化曲线,依据方向盘转角变化情况将紧急转向变道过程分成3个阶段。第1阶段为避撞阶段,从驾驶员开始转向避撞行为的时刻 $T_0$ 为开始,以方向盘转角达到最大值的时刻 $T_1$ 为终点;第2阶段为侧移阶段,从方向盘转角达到最大值时刻 $T_1$ 开始,以方向盘转角到达反方向的最大值时刻 $T_2$ 为终点;第3阶段为稳定阶段,以方向盘转角达到反方向最大值的时刻 $T_2$ 开始,到变道终止时刻 $T_3$ 。

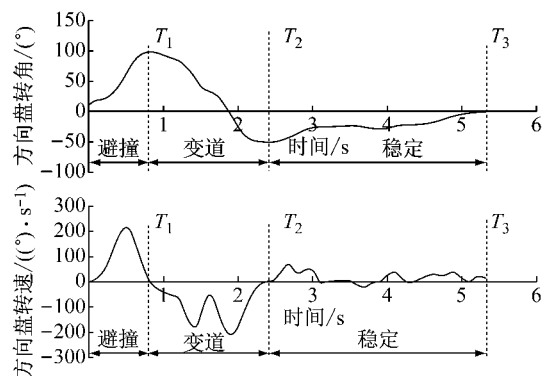


图2 紧急转向变道的阶段划分

Fig.2 Phase division of emergency lane changing

以方向盘转角第一次大于  $8^\circ$  的时刻作为紧急转向变道的起始时刻  $T_0$ ; 变道的终止时刻  $T_3$  为方向盘转角从方向盘转角达到反方向最大值的时刻  $T_2$  后变为  $0^\circ$  的时刻点。

### 3 驾驶员转动基元的定义

紧急转向变道是人-车-路多种因素共同作用的过程, 本文重点研究在危险工况下驾驶员作用于车辆的输入特征, 通过引入转动基元的方法进行分析。

在紧急转向的操作中, 驾驶员通过调整方向盘转动的速率来完成特定的方向盘转动角度。方向盘转速和方向盘转角是描述驾驶员转向行为的重要参数。驾驶员完成某一特定方向盘转角时, 方向盘转速的波形特征为单峰值的类似正态分布的曲线, 如图 3 所示。

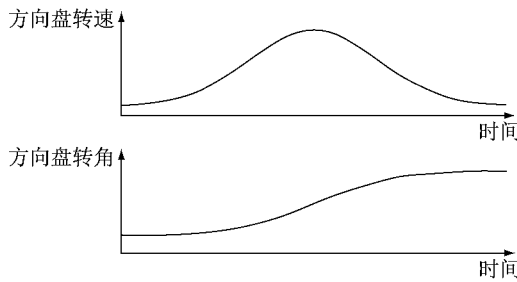


图 3 驾驶员转向基元的曲线

Fig.3 Curve profile of steering primitive

定义如式(1)所示的高斯函数方程, 为一个正态分布的转向基元, 在机理上可理解为驾驶员的一次转向修正行为。

$$\dot{\delta}(t) = \dot{\delta}_m \exp\left[-\frac{(t-b)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中:  $\dot{\delta}_m$  为方向盘转速最大值;  $b$  和  $\sigma$  是通过自然驾驶工况中的方向盘转速数据得到的拟合参数,  $\sigma$  是表征转向基元持续时间的参数。

在整个转向过程中方向盘转速由多个峰值组合而成, 在紧急转向变道的不同阶段由于约束条件的不同, 驾驶员的转向行为可能由  $i(\geq 2)$  个转向基元部分重叠组成, 函数表达式如式(2)所示。

$$\dot{\delta}(t) = \sum_{i=1}^n \left( \dot{\delta}_{mi} \exp\left[-\frac{(t-b_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \right) \quad (2)$$

### 4 紧急转向变道行为特征的研究

#### 4.1 紧急转向变道避让阶段的行为分析

整个避让阶段以驾驶员开始转向避让行为的时

刻  $T_0$  为起点, 以方向盘转角最大值时刻  $T_1$  为终点。驾驶员在避让阶段通常伴随较大的方向盘转速, 使车辆转动一定的角度, 避免碰撞的发生。

对 33 例紧急转向变道工况的避让阶段方向盘转速进行高斯函数拟合, 如表 1 所示。33 例工况中有 31 个可以由 1 个正态分布的转向基元组成, 拟合系数  $R^2$  的平均值大于 0.85。图 4 所示是工况 1 和工况 7 的拟合结果。

表 1 避让阶段的拟合结果

工况总数	由 1 个正态分布的转向基元组成的工况			
	数量	拟合系数 $R^2$ 的平均值	拟合参数 $\sigma$ 的平均值 $\sigma_{avg}$	持续时间平均值 $T_{1-avg}$
33	31	0.9	0.16	0.80

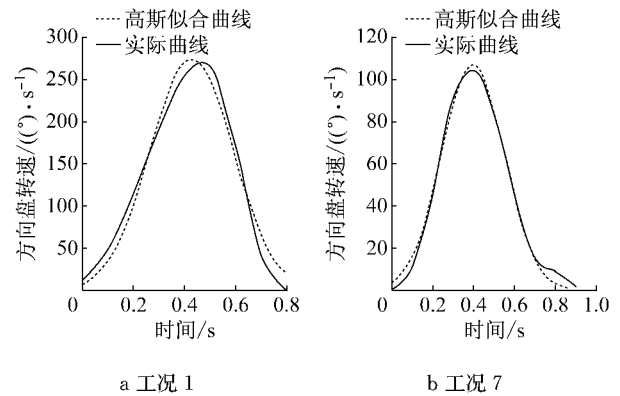


图 4 工况 1,7 避让阶段的转向拟合情况

Fig.4 Fitting results of avoidance steering phase in Case 1 and Case 7

紧急情况下驾驶员的转向行为是快速性和准确性的平衡过程。在避让阶段主要作用是避免碰撞发生, 快速性是首要的, 目标范围是能够避免碰撞的区域。90% 以上的紧急转向变道工况, 避让阶段驾驶员的转向行为由 1 个转向基元组成。

#### 4.1.1 避让阶段的持续时间分析

$\sigma$  是表征曲线时间跨度的参数。图 5 所示是避让阶段拟合参数  $\sigma$  的分布图, 数据的标准偏差为 0.04, 数值集中在 0.1~0.2 之间, 平均值  $\sigma_{avg} = 0.16$ , 说明避让阶段的高斯拟合的转向基元在时间跨度上是基本恒定的, 间接表明紧急转向变道工况的避让阶段驾驶员转向的持续时间保持恒定。

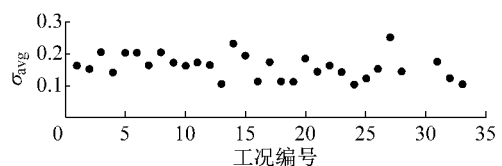


图 5 避让阶段拟合参数  $\sigma$  分布图

Fig.5  $\sigma$  distribution of avoidance steering phase

如表 1 所示,避撞阶段的拟合参数  $\sigma$  的平均值  $\sigma_{\text{avg}}$  与波形的持续时间  $T_{\text{wl}}$  的平均值  $T_{1-\text{avg}}$  的关系,满足  $T_{1-\text{avg}}=5\sigma_{\text{avg}}$ . 用最小二乘法进行拟合分析避撞阶段的持续时间  $T_{\text{wl}}$  和高斯拟合参数  $\sigma$  的关系,如图 6 所示,线性拟合系数  $R^2=0.86$ ,比例关系为  $T_{\text{wl}}\approx 5\sigma$ .

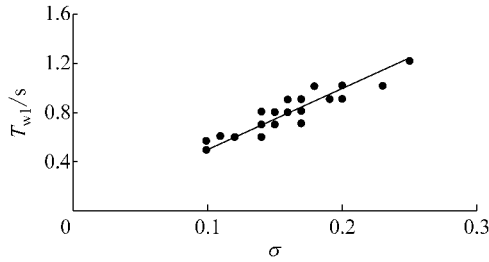


图 6 参数  $\sigma$  与持续时间  $T_{\text{wl}}$  的线性关系

Fig. 6 Linear relation between  $\sigma$  and duration  $T_{\text{wl}}$

图 7 为 33 例工况的避撞阶段持续时间  $T_1$  分布情况,其中大于 1 s 的是工况 29 和工况 30,由于这 2 个工况由 2 个高斯函数拟合而成,故持续时间较长. 总体分析避撞阶段的持续时间集中在 0.5~1.0 s,均值为  $T_{1-\text{avg}}=0.8$  s.

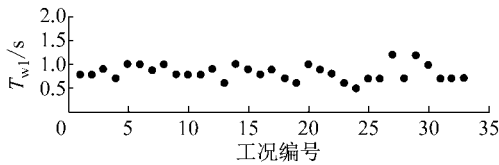


图 7 避撞阶段的持续时间  $T_{\text{wl}}$  分布情况

Fig. 7  $T_{\text{wl}}$  distribution of avoidance steering phase

#### 4.1.2 避撞阶段方向盘最大转速和最大转角关系

在避撞阶段对方向盘转速进行积分,可得到方向盘转角的变化,即方向盘转角的最大值;避撞阶段的方向盘转速由 1 个高斯函数表达的转向基元组成,如式(1)所示. 方向盘最高转速  $\dot{\delta}_m$  与方向盘转角最大值  $\delta_{T1}$  的关系为

$$\delta_{T1} = \int \dot{\delta}_m \exp\left[-\frac{(t-b)^2}{2\sigma^2}\right] dt = \sqrt{2\pi}\sigma \dot{\delta}_m$$

$$\dot{\delta}_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \delta_{T1}$$

引入比例因子  $K$ ,有

$$K = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (3)$$

$$\dot{\delta}_m = K\delta_{T1} \quad (4)$$

$K$  与  $\sigma$  的关系,如图 8 所示. 如上分析,高斯拟合参数  $\sigma$  保持恒定,数值集中在 0.1~0.2 之间,平均值  $\sigma_{\text{avg}}=0.16$ ,带入式(3), $K$  值集中在 2.0~4.0

之间,平均值  $K_{\text{avg}}=2.5$ ,故方向盘转速最大值与方向盘转角最大值成线性相关,线性比例为  $K$ .

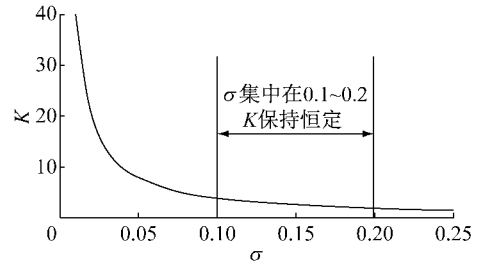


图 8 比例因子  $K$  与参数  $\sigma$  的关系

Fig. 8 Scaling factor  $K$  versus  $\sigma$

图 9 为 33 例紧急变道工况避撞阶段的方向盘最高转速和转角最大值的线性关系图,用最小二乘法进行拟合,线性相关系数为 0.97,线性比例为 2.21 (与拟合得到的  $K_{\text{avg}}$  接近).

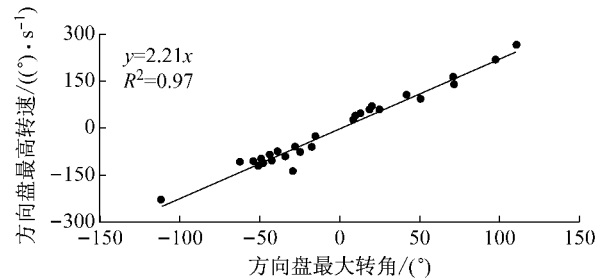


图 9 避撞阶段方向盘最高转速和转角最大值的线性关系

Fig. 9 Linear relation between maximum steering angle rate and maximum steering angle

避撞阶段驾驶员的方向盘转速曲线由 1 个高斯函数拟合的转向基元组成,方向盘转速峰值出现时刻为  $T_1/2$ (避撞阶段持续时间的一半). 方向盘转速最大值和转角最大值线性相关,可根据方向盘最高转速,提前约 0.4 s( $T_{1-\text{avg}}=0.8$  s)判断驾驶员的方向盘转角最大值.

进一步分析可知驾驶员的转向基元是一个持续时间恒定( $T_{1-\text{avg}}=0.8$  s),方向盘转速和转角变化线性相关( $K=2.21$ )的开环模型.

#### 4.2 紧急转向变道侧移阶段的行为分析

侧移阶段从方向盘转角为最大值的时刻  $T_1$  开始,驾驶员反方向转动方向盘,车辆侧向移动进入车道,方向盘转角逐渐减小,方向盘转角为  $0^\circ$  时车辆的航向角最大,为了防止车辆侧向位移过大超出车道边界,驾驶员继续反方向转动方向盘,方向盘转角到达反方向的最大值的时刻  $T_2$  为侧移阶段的终点.

在侧移阶段紧急转向的主要作用是保证车辆进入车道,目标范围是车道范围区域. 与避撞阶段的方向盘转速曲线比较,侧移阶段的方向盘转速曲线存

在多个峰值,且持续时间长. 避撞阶段的目标范围是能够避免碰撞的区域,且对转向的快速性有要求;而在侧移阶段目标范围缩小到车道范围,约束范围是车道边界,对转向的准确性有要求,驾驶员一般会采用多次转向修正的方式来确保侧向运动的准确性. 不同的约束条件和转向目的,是驾驶员采用不同转向方式的原因.

用式(2)多个转向基元的组合对 33 例紧急变道工况的侧移阶段进行拟合. 拟合结果表明,侧移阶段的转向一般由 2~4 个转向基元组成.

以工况 3 和工况 12 为例,如图 10,11 所示. 方向盘转速曲线分别由 2 和 4 个转向基元组成,每个转向基元的高斯函数参数如表 2,3 所示. 单个转向基元的拟合参数  $\sigma$  和避撞阶段的拟合参数  $\sigma$  在同一范围内(0.1~0.2),说明在不同阶段,组成驾驶员转向行为的转向基元是相同的,只是各阶段的转向运动的约束条件不同,转向基元的数目和组合方式有所不同.

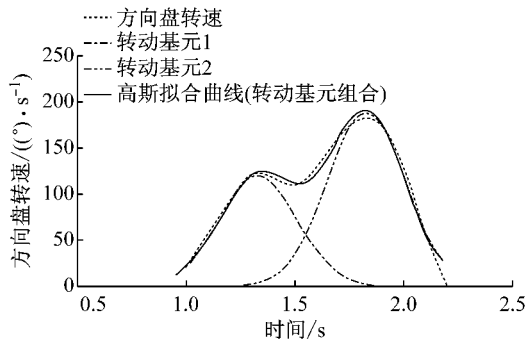


图 10 工况 3 侧移阶段的方向盘转速拟合

Fig. 10 Fitting results for steering wheel rate of lateral movement phase in Case 3

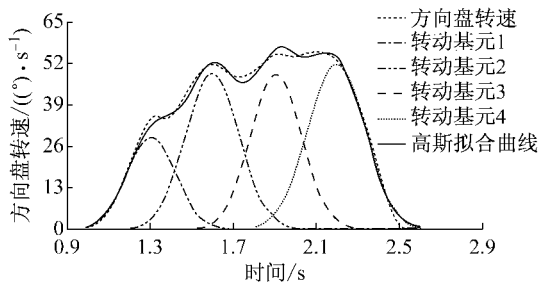


图 11 工况 12 侧移阶段的方向盘转速拟合

Fig. 11 Fitting results for steering angle rate of lateral movement phase in Case 12

4.2.1 侧移阶段的持续时间分析

比较工况 3 和工况 12 转向基元峰值的时间间隔,工况 3 为 0.5 s,工况 12 为 0.3 s,工况 3 和工况 12 的侧移阶段的持续时间  $T_{w2}$  都为 2.5 s,侧移阶段

表 2 工况 3 侧移阶段的拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of lateral movement phase in Case 3

转向基元	转速峰值/( $^{\circ} \cdot s^{-1}$ )	$\sigma$	b/s
转向基元 1	119.5	0.18	1.3
转向基元 2	188.3	0.18	1.8

表 3 工况 12 侧移阶段的拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of lateral movement phase in Case 12

转向基元	转速峰值/( $^{\circ} \cdot s^{-1}$ )	$\sigma$	b/s
转向基元 1	29.1	0.12	1.3
转向基元 2	49.0	0.13	1.6
转向基元 3	48.6	0.12	1.9
转向基元 4	51.5	0.14	2.2

的转向行为由多个转向基元组成,组合方式因驾驶员的驾驶风格和工况有所不同,转动修正越多,修正的间隔也会有所减少,但侧移阶段总体的持续时间基本是集成的.

图 12 是 33 例紧急转向工况变道持续时间的分布情况,侧移阶段时间集中分布在 1.0~2.0 s,持续时间的均值为  $T_{2-avg}=1.5$  s.

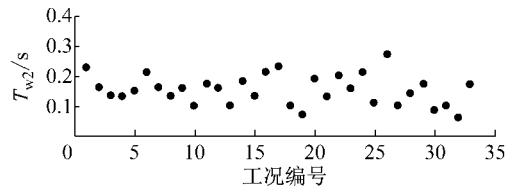


图 12 侧移阶段的持续时间分布  $T_{w2}$

Fig. 12  $T_{w2}$  duration time distribution of lateral movement phase

4.2.2 侧移阶段方向盘转速和转角变化的关系

侧移阶段的方向盘转速是由多个高斯函数拟合的转向基元组合而成,如式(2)所示,则侧移阶段方向盘转角变化( $T_1$  与  $T_2$  时刻方向盘转角的差值)为

$$\Delta\delta_c = \int \dot{\delta}(t)dt = \int \sum_{i=1}^n (\dot{\delta}_{mi} \exp[-\frac{(t-b_i)^2}{2\sigma_i^2}]) = \sqrt{2\pi} \sum_{i=1}^n \dot{\delta}_{mi} \sigma_i = \sqrt{2\pi} \sigma \sum_{i=1}^n \dot{\delta}_{mi} \quad (5)$$

根据上节分析,每个转向基元的高斯拟合参数  $\sigma$  保持恒定,且每个转向基元的方向盘转速峰值和转角变化都符合线性关系,线性比例  $K=2.21$ (图 9),将式(3)代入式(5),得

$$\sum_{i=1}^n \dot{\delta}_{mi} = K\Delta\delta_c \quad (6)$$

式(6)表明在侧移阶段驾驶员转向基元的峰值之和与转角变化成线性关系,线性比例为  $K=2.21$ . 33 例紧急变道工况的侧移阶段的方向盘转速峰值之

和与转角变化( $T_1$  与  $T_2$  时刻方向盘转角的差值)的关系如图 13 所示,线性相关系数为 0.93,线性比例为 2.24,与理论推导基本一致.驾驶员侧移阶段的转向过程是由多个开环的转向模型组成,每一个转向基元就是一个开环模型.

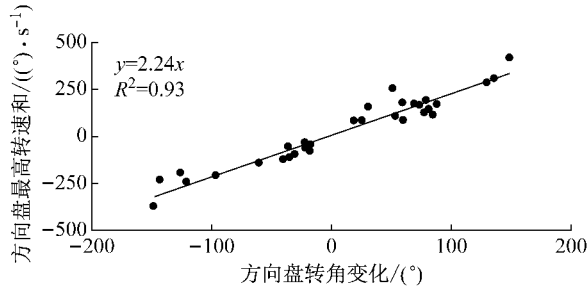


图 13 侧移阶段方向盘转速峰值之和与转角变化的线性关系  
Fig.13 Linear relation between sum of steering angle rate peak and steering angle deflection

上述分析表明,侧移阶段的整体持续时间保持恒定.式(7)引入参数  $K_c$ .研究侧移阶段方向盘最高转速与方向盘转角变化之间的关系,有

$$\dot{\delta}_{mc} = K_c \Delta\delta_c \quad (7)$$

式中: $\dot{\delta}_{mc}$ 是侧移阶段方向盘转速的最大值.图 14 为 33 例紧急变道工况的侧移阶段的方向盘最高转速(反方向)和转角变化( $T_1$  与  $T_2$  时刻方向盘转角的差值)的关系图,线性相关系数为 0.94,线性比例为 1.24,表明侧移阶段方向盘转速最大值与转角的变化成线性相关.

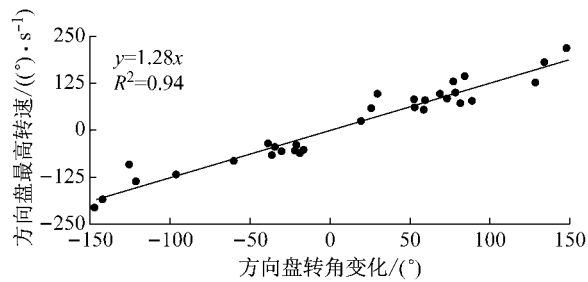


图 14 侧移阶段方向盘转速最大值和转角变化的线性关系  
Fig.14 Linear relation between maximum steering angle rate and steering angle deflection

引入参数  $\sigma_c$ ,则式(7)进一步变化为

$$\Delta\delta_c = K_c \dot{\delta}_{mc} = \sqrt{2\pi}\sigma_c \dot{\delta}_{mc} \quad (8)$$

式(8)的形式与单个转向基元推导的转速和转角的关系一致,说明侧移阶段的方向盘转速可表示为一个拟合参数为  $\sigma_c$ ,峰值为  $\dot{\delta}_{mc}$ 的高斯函数.图 15, 16 是工况 3 的方向盘转速和转角拟合曲线,表 4 为工况 3 的拟合参数列表;图 17,18 是工况 12 的方向

盘转速和转角的拟合情况,表 5 为工况 12 的拟合参数列表.方向盘转角的拟合程度很高,说明在侧移阶段驾驶员的转向行为整体上也可以用一个正态分布

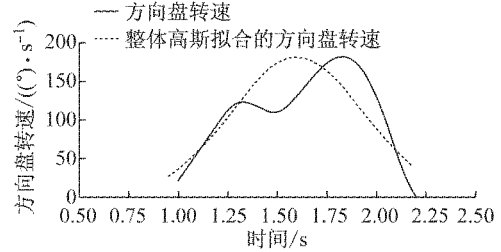


图 15 工况 3 侧移阶段方向盘转速的整体拟合  
Fig.15 Fitting results for steering angle rate of lateral movement phase in Case 3

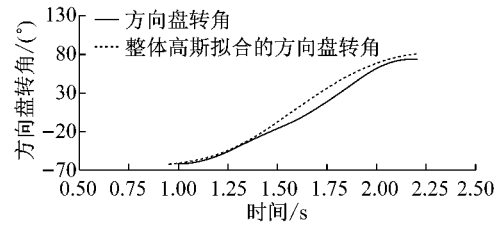


图 16 工况 3 侧移阶段方向盘转角的整体拟合  
Fig.16 Fitting results for steering angle of lateral movement phase in Case 3

表 4 工况 3 侧移阶段的整体拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of lateral movement phase in Case 3

转速峰值/( $^{\circ}$ · $s^{-1}$ )	$\sigma$	$b/s$
151.5	0.41	1.6

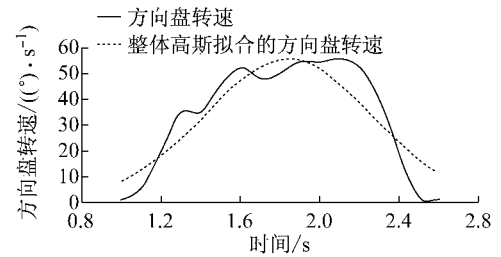


图 17 工况 12 侧移阶段方向盘转速的整体拟合  
Fig.17 Fitting results for steering angle rate of lateral movement phase in Case 12

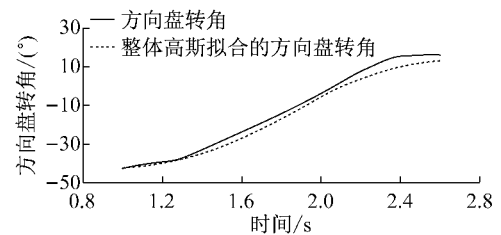


图 18 工况 12 侧移阶段方向盘转角的整体拟合  
Fig.18 Fitting results for steering angle of lateral movement phase in Case 12

的高斯函数表征.

侧移阶段整体拟合的高斯函数曲线,是多个转向基元组合的结果,在驾驶行为上可以理解为驾驶员的每次转向修正都是为了满足最终的转向结果.与单个转向基元相比,拟合参数  $\sigma_c$  越大,持续时间越长.

表 5 工况 12 侧移阶段的整体拟合参数

Tab.5 Fitting parameters of lateral movement phase in Case 12

转速峰值/ $(^\circ \cdot s^{-1})$	$\sigma$	$b/s$
56	0.42	1.84

### 4.3 紧急转向变道稳定阶段的行为分析

紧急转向变道稳定阶段,以方向盘转角达到反方向最大值时刻  $T_2$  开始到变道终止时刻  $T_3$  结束.以工况 8,工况 15 为例进行分析.图 19,20 分别是方向盘转速和方向盘转角的曲线.工况 8 持续时间为 1.8 s,工况 15 持续时间为 4.6 s,持续时间不同.进一步分析 33 例工况稳定阶段的持续时间分布,如图 21 所示,持续时间分布的离散性较大,持续时间的平均值  $T_{3-avg}=2.3$  s.

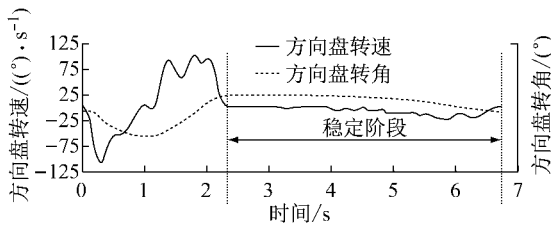


图 19 工况 8 稳定阶段方向盘转速和转角曲线

Fig.19 Curve profile of steering angle rate and steering angle during stabilization phase of Case 8

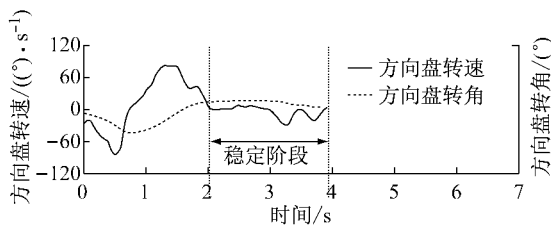


图 20 工况 15 稳定阶段方向盘转速和转角曲线

Fig.20 Curve profile of steering angle rate and steering angle during stabilization phase of Case 15

稳定阶段的转向是车道保持的过程,目标范围是车道中心线附近,转向目标范围更小,所以持续时间总体上要更长.

分析工况 8 和工况 15 的稳定阶段方向盘转速,其波形特点是由多个峰值小的转向基元组成,转向基元的参数特征与避让、侧移阶段的相同,分析方法同前.3个阶段的转向基元具有一致性,并不随着驾

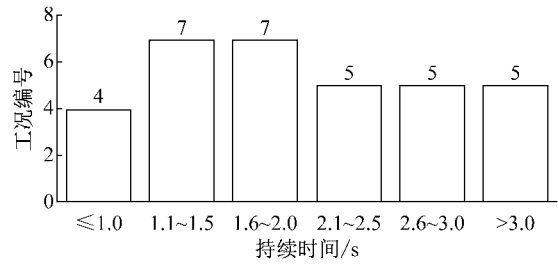


图 21 稳定阶段的持续时间分布情况

Fig.21 Time distribution of stabilization phase

驶工况的改变而改变,转向基元表征了驾驶员转向行为的一般特征.

稳定阶段的转向存在转速为零的时间段,转向基元的组合方式受驾驶员驾驶方式和具体的驾驶环境的影响较大,并不能用统一的方式表达稳定阶段的转向行为.

## 5 紧急转向变道行为特征的讨论

驾驶员的紧急转向变道行为在本质上是由多个转向基元组成,方向盘转速表达式为

$$\dot{\delta}(t) = \sum_{i=1}^n \dot{\delta}_i(t) \quad (9)$$

式中: $\delta_i(t)$ 为第  $i$  个转动基元.把每一个转向基元看作是一次转向修正,那么紧急转向变道过程实际上是一种通过转向修正不断趋向目标的过程.每一个转向基元的持续时间都是恒定的,方向盘最高转速和转角变化线性相关.

紧急转向变道过程,驾驶员的转向行为也符合人体行为学领域的规律.Morasso<sup>[18]</sup>提出了趋向行为(reaching behavior)理论,解释了人体手部在完成目标物体的接近触碰动作时速度和位移的关系,手部运动的速度变化呈现为类似正态分布的曲线,运动的时间恒定,手部运动速度最大值和最大位移线性相关.在紧急变道转向过程中驾驶员将车辆看作物体的一部分,方向盘转速和转角相对于手部的速度和位移,转向基元的规律特征与趋向行为理论提出的手部运动特征完全符合.

Flash 等<sup>[19]</sup>进一步研究发现,所有的人体手部运动都由上述正态分布的运动基元组成,根据约束条件不同,运动基元的组合方式不同.在快速接近目标阶段的运动由单个运动基元组成;在精准地触碰目标物体的手部运动持续时间会变长,运动过程由多个幅值较小的运动基元组成.

本文研究的 3 个阶段的转向行为特征分析,也符合 Flash 等<sup>[19]</sup>的研究规律.在避让阶段,转向目标

是快速靠近避免碰撞的区域,转向由1个转向基元组成,持续时间最短;在侧移阶段,转向目标是车道边界范围内,随着目标范围的缩小,由2~4个转向基元组成;在稳定阶段,转向目标是稳定在车道中心线,目标进一步缩小,转向行为由更多峰值较小的转向基元组成,持续时间最长。

## 6 结论

本文的研究结果表明,驾驶员在紧急变道工况下的紧急转向是由多个可通过高斯函数拟合的转向基元组成,转向基元是表征驾驶员转向行为的重要元素。转向基元组合的方式随着各阶段的转向目标和约束条件不同而不同;在避撞阶段的方向盘转速由1个转向基元组成,在变道阶段和稳定阶段的方向盘转速由多个的转向基元组合而成。

进一步的讨论表明驾驶员的转向行为符合人体行为学的趋向行为(reaching behavior)特征。驾驶员的转向行为实质上是由多个转向基元组合而成,每个转向基元都是一个开环模型,方向盘的最高转速和转角变化线性相关,即可以通过方向盘的最高转速来预判驾驶员的转向行为。

在紧急转向工况中,驾驶员方向盘转角和TTC、前后车辆的速度差、侧向位移等因素有关。本文研究得到的驾驶员紧急转向特征可用于建立紧急转向辅助系统的控制方法和驾驶员转向模型。

### 参考文献:

- [1] ECKERT A, SEVENICH M, RIETH P E. Emergency steer & brake assist—a systematic approach for system integration of two complementary driver assistance systems[J]. *European Journal of Political Research*, 2011, 50(4):441.
- [2] BEVAN G P, GOLLEE H, O'REILLY J. Trajectory generation for road vehicle obstacle avoidance using convex optimization [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2010, 224(4):455.
- [3] HATTORI Y, ONO E, HOSOE S. Optimum vehicle trajectory control for obstacle avoidance problem [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(5):507.
- [4] MÁRTENSSON J, NYBACKA M, JERRELIND J, *et al.* Evaluation of safety distance in vehicle platoons by combined braking and steering[C/CD]//11th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Seoul: Japan Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [5] FAUSTEN M. Accident avoidance by evasive manoeuvres[C/CD]//Proceedings of the 4th Tagung Sicherheit Durch Fahrerassistenz (TVSD). Munich: [s.n.], 2010.
- [6] LEE T, KIM B, YI K, *et al.* Development of lane change driver model for closed-loop simulation of the active safety system[C]//International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. [S.l.]: IEEE, 2011:56-61.
- [7] HIGHWAY N, CHOVAN J D, TIJERINA L, *et al.* Examination of lane change crashes and potential IVHS countermeasures[R]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 1994.
- [8] NELSON W. Continuous-curvature paths for autonomous vehicles[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.]: IEEE, 1989:1260-1264.
- [9] PAPANIMITRIOU I, TOMIZUKA M. Fast lane changing computations using polynomials [C]//American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2003:48-53.
- [10] BASCUNANA J L. Analysis of lane change crash avoidance[C/CD]//SAE Paper. [S.l.]: SAE, 1995: 951895.
- [11] 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 & Behaviour*, 2002, 5(2):123.
- [12] BENDERUS O, MARKKULA G. Evidence for a fundamental property of steering[C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. [S.l.]: SAGE Publications, 2014:884-888.
- [13] BENDERUS O, MARKKULA G, WOLFF K, *et al.* Driver behaviour in unexpected critical events and in repeated exposures—a comparison[J]. *European Transport Research Review*, 2014, 6(1):51.
- [14] BENDERUS O. Modelling driver steering and neuromuscular behavior[D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
- [15] HONG T, KWON J, PARK K, *et al.* Development of a driver's intention determining algorithm for a steering system based collision avoidance system [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2013, 38(5):443.
- [16] MARCO G. Optimal control based ADAS for driver warning and autonomous intervention using maneuver jerks for risk assessment[R]. Trento:University of Trento, 2013.
- [17] BRANNSTROM M, COELINGH E, SJOBERG J. Model-based threat assessment for avoiding arbitrary vehicle collisions[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 11(3):658.
- [18] MORASSO P. Spatial control of arm movements [J]. *Experimental Brain Research*, 1981, 42(2):223.
- [19] FLASH T, HOCHNER B. Motor primitives in vertebrates and invertebrates[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2005, 15(6):660.