

基于自然驾驶数据的驾驶员紧急转向变道模型

吴 斌^{1,2}, 朱西产¹, 沈剑平²

(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)

摘要: 提出了一种以驾驶员转向目标瞄点为核心的、面向操纵层的驾驶员紧急转向变道的模型建立方法. 基于驾驶员紧急变道的阶段特征, 提出了驾驶员紧急变道侧向运动轨迹的规划方法, 并结合远近目标点理论分析方法, 分阶段建立了驾驶员转向变道工况的驾驶员转向模型. 对紧急转向变道中避撞、侧移和稳定阶段的增益因子的分布特征进行了研究, 模型能够真实地预测自然驾驶中的紧急转向变道行为.

关键词: 自然驾驶行为; 紧急变道; 转向; 驾驶模型

中图分类号: U471.1

文献标志码: A

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

WU Bin^{1,2}, ZHU Xichan¹, SHEN Jianping²

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. National Center of Supervision and Inspection on Motor Vehicle Products Quality (Shanghai), Shanghai 201805, China)

Abstract: A method for establishing the lane changing steering model was presented, which was based on the steering target aiming point of the driver and was oriented to the steering maneuver layer. Based on the characteristics of the emergency lane changing, a lateral trajectory model was established. Combined with the theory of far and near aimed point, a driver steering model of lane changing was established and the distribution characteristics of gain factors were studied. The research results show that the steering model performs well when explaining realistic emergency steering behavior.

Key words: naturalistic driving behavior; emergency lane changing; steering; driver model

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^[1], 相对于制动避撞, 紧急转向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^[2-4]; 但紧急转向变道是驾驶员容易操作失误, 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^[1-5], 但如何准确分析真实驾驶员的紧急转向变道行为特征, 并建立相应的驾驶员模型, 是目前开发紧急转向避撞系统的难点.

紧急工况下的驾驶员转向模型往往是基于经典控制或现代控制理论建立的, 通过简化驾驶员转向操作或预瞄最优变道路径来实现转向控制. 简化的驾驶员转向模型有利于快速得到驾驶员的紧急转向避撞轨迹和驾驶员操纵特征, 典型的简化方法如 Lee 等^[6]、Chovan 等^[7]、Bascunana^[8]都是用正弦函数对驾驶员紧急转向进行建模; Nelson^[9]则是用多项式对驾驶员的紧急转向进行建模. 上述的简化模型过于理想化, 无法很好地复原驾驶员的紧急转向特征, 有一定的局限性.

大量的研究表明, 驾驶员在转向过程中采用目标点的视觉导向来进行转向控制. 根据国外学者^[10]的研究, 驾驶员在转向过程中通过预瞄车辆前方的近点区域(near point)和远点区域(far point)来控制车辆的运动; Salvucci 等^[11-12]利用远近两个目标点的视觉导向建立了驾驶员转向模型. 上述驾驶员模型能很好地表现驾驶员的转向机理, 但仅适用于正常驾驶工况, 并未开展对紧急转向工况模型建立的研究.

为了建立更加符合实际驾驶员紧急转向特征的变道模型, 本文利用中国自然驾驶数据中的紧急转向变道工况, 提出了驾驶员紧急转向变道驾驶侧向

研究紧急工况下的驾驶员行为是开发先进驾驶

收稿日期: 2019-02-15

基金项目: 上海市科委研发平台项目(19DZ2292200)

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开发. E-mail: binw@smvic.com.cn

通信作者: 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: xczhu@163.com

运动轨迹的规划方法. 基于此,利用远、近目标点的转向理论,建立了紧急转向变道工况的驾驶员转向模型. 研究表明,所建立的驾驶员转向模型能较好地复现驾驶员紧急转向变道行为.

1 自然驾驶数据的采集和筛选

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)的自然驾驶工况数据. 自然驾驶数据包含:① CAN(controller area network, 控制器局域网)总线数据;② 外接传感器,包括独立加速度传感器,用于保证数据的完整性和准确性;③ 摄像头数据,分别为前置摄像头、前置广角摄像头、车内驾驶员面部摄像头、踏板摄像头(图 1). 数据采集从人、车、路 3 个方面出发,采集驾驶员日常驾驶行为数据、车辆行驶运动状态参数和道路交通环境信息. 项目采集了 32 名驾驶员的驾驶数据,共计约 3 559 h,总行程 129 109 km.

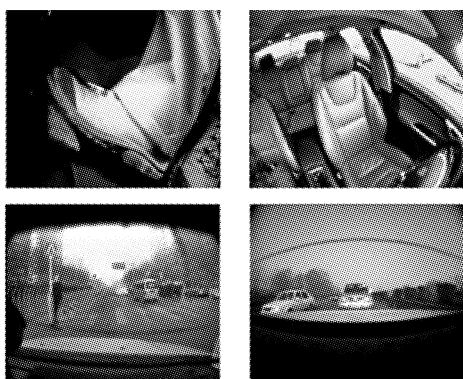


图 1 自然驾驶工况采集中的摄像头视角

Fig.1 Imaging view of cameras in naturalistic driving data

在紧急转向变道工况中驾驶员的方向盘转速和碰撞时间(time to collision, TTC)值是衡量变道过程是否紧急的重要因素^[13-14]. 当 TTC 小于 2 s,且两车相对速度大于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,驾驶员更易用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^[15-16]. 本文参考国外研究,将最大方向盘转速 $\dot{\delta}_{f,\max} > 50^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ 、TTC 小于 2.0 s 作为判定驾驶员是否采取紧急转向变道的筛选条件^[17]. 结合 CAN 总线所记录的车辆行驶数据和摄像头采集的视频数据,得到符合紧急变道条件的工况共有 50 例.

在本文的研究中将危险场景的行车环境定义为驾驶危险域,驾驶危险域分为主观危险域、物理极限危险域以及碰撞减轻域. China-FOT 自然驾驶数据

中采集到 50 例紧急转向危险场景,都属于主观危险域的行车环境(未发生碰撞),主观危险域为大部分驾驶员可通过紧急制动和紧急转向来避免碰撞发生的区域;物理极限危险域为一般驾驶员无法避免碰撞区域,需要通过车辆的紧急控制来避免碰撞的发生;碰撞减轻区域为碰撞无法避免,只能通过车辆控制减轻碰撞的程度.

2 驾驶员紧急变道侧向轨迹模型

人体行为学研究表明:一般情况下人类在进行运动路径的规划时都遵循最优控制原则,保证运动路径的平顺性^[18]. 但在紧急变道过程的路径轨迹中,驾驶员不仅要考虑轨迹平顺性的要求,同时还要考虑与前车避撞的约束条件. 本文研究在短时间内紧急转向变道的路径规划,引入碰撞时间 TTC,采用最优控制方法来建立紧急变道侧向轨迹模型.

不失一般性,以图 2 向左转向避撞的变道工况为例,将两车视作相同的矩形,车辆长 $L=5.2 \text{ m}$,宽 $w=2.0 \text{ m}$,重叠率为 100%. 对车辆进行简化处理,质心到前轴的距离 $L_f=2.5 \text{ m}$,到后轴距离为 $L_r=2.7 \text{ m}$. 图中, D 为距离, φ 为航向角.

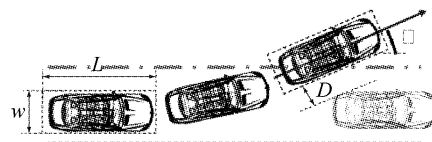


图 2 紧急转向避撞示意图

Fig.2 Collision avoidance by steering

2.1 车辆模型

考虑到车辆侧向位移的复杂性,同时为了获取更准确的计算结果,选取二自由度单轨车辆模型如图 3 所示. 图中,质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 为状态变量, V 为车辆行驶速度, v 、 u 分别为车辆侧向、纵向速度.

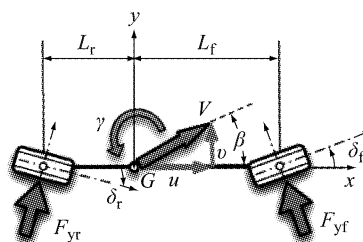


图 3 二自由度单轨车辆模型

Fig.3 Model of two-degree-of-freedom single track vehicle

通过自然驾驶数据分析表明,驾驶员在紧急转向变道过程中车速变化量很小,故在模型中选取恒定车速 v_0 ,即不考虑在转向过程中驾驶员纵向操纵的影响. 车辆状态方程可表达为

$$\begin{aligned} mv_0(\dot{\beta}(t) + \gamma(t)) &= F_{yf}(t) + F_{yr}(t) \\ I_z \dot{\gamma}(t) &= L_f F_{yf}(t) - L_r F_{yr}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: m 为车辆的质量; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量; F_{yf} 和 F_{yr} 分别表示左、右两个前轮、后轮的轮胎力在车辆坐标系下的分量,在此假设左、右两个轮胎力相等.

采用 Pacejka 轮胎模型,将车辆坐标系变量转换到大地坐标系,得到非线性单轨车辆模型为

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi(t), U(t)) \quad (2)$$

式中: $\xi = [\beta, \gamma, \varphi, X, Y, \delta_f]$; X, Y, φ 分别为车辆在大地坐标系中沿 x 轴的位置、沿 y 轴的位置以及航向角; δ_f 为驾驶员方向盘转角. 输入 $U = \dot{\delta}_f$ 为驾驶员方向盘转速. 假设道路摩擦系数为已知的外部参数.

2.2 紧急转向避撞的约束条件

2.2.1 驾驶员避撞与前车碰撞的几何约束

避免与前方障碍物发生碰撞,车辆质心在大地坐标系中坐标为 (X, Y) , 航向角为 φ , 图 2 中右前顶点坐标 (x_{Lf}, y_{Lf}) 可表述为

$$\begin{cases} x_{Lf} = X + L_f \cos \varphi - \frac{w}{2} \sin \varphi \\ y_{Lf} = Y + L_f \sin \varphi + \frac{w}{2} \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

以图 2 所示工况为例,在本车通过目标车时,目标车左后角 (x_0, y_0) 到本车右侧边界距离 D 大于一定的安全距离 D_{sm} , 即

$$D = \frac{cx_0 - y_0 + y_{rf} - cx_{rf}}{\sqrt{1+c^2}} \geq D_{sm} \quad (4)$$

式中: c 为本车右侧边界所在直线斜率, $c = \tan \varphi$; (x_{rf}, y_{rf}) 为本车矩形边界的右上顶点坐标.

2.2.2 驾驶员输入特性的约束

驾驶员在转向避撞时车辆的侧向加速度不能超过一定的限制,过高的侧向加速度会导致车辆的失稳,侧向加速度满足 $|a_y| \leq a_{y, \max}$, 即

$$|v_0(\dot{\beta} + \gamma)| \leq a_{y, \max} \quad (5)$$

式中: $a_{y, \max}$ 为车辆的极限侧向加速度.

驾驶员转向避撞操纵,受到驾驶员进行方向盘转速的操作能力限制,驾驶员的方向盘转角操纵不能超过一定的限值,即

$$|\dot{\delta}_f| \leq \dot{\delta}_{f, \max} \quad (6)$$

式中: $\dot{\delta}_{f, \max}$ 为驾驶员的极限方向盘转速.

2.3 紧急转向变道避撞路径的优化拟合

驾驶员在紧急转向变道的路径规划时,优化目标是保证轨迹的平顺性,紧急转向变道避撞的路径优化目标函数表达式如下:

$$J = S(\xi(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(\xi, U, t) dt \quad (7)$$

式中: t_0 表示变道的起始时刻; t_f 表示变道的终止时刻. 等号右边第一项表示终值目标函数,目的是控制结果使最终得到的结果更加接近目标集,为 Mayer 型目标函数. 等号右边第二项代表过程目标函数,目的是对整个过程进行控制,使其满足一定的状态条件,为 Lagrange 型目标函数.

依据驾驶员变道过程中的方向盘转角和转速特征,将紧急转向变道分成 3 个阶段,如图 4 所示.

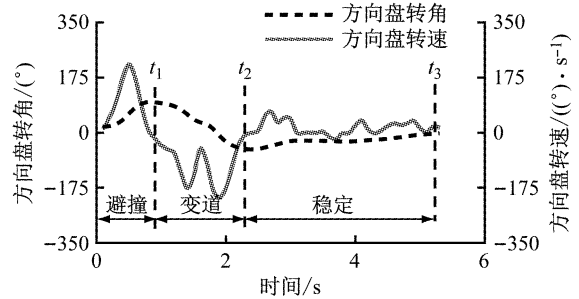


图 4 紧急转向变道的阶段划分

Fig. 4 Phase division of emergency lane changing

第 1 阶段是避撞阶段,从驾驶员开始转向避撞的时刻 t_0 开始,以方向盘转角达到最大值时刻 t_1 为终点. 从自然驾驶数据分析避撞阶段的持续时间约为 0.8 s,起始时刻 t_0 开始到 $t_1 = 0.8$ s^[19] 结束. 避撞阶段目的是避免碰撞发生,满足避撞的几何条件约束.

第 2 阶段是侧移阶段,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最大值时刻 t_2 为终点. 从自然驾驶数据分析侧移阶段的持续时间为 2 s^[19],从 t_1 开始到 $t_2 = 2.8$ s 结束. 侧移阶段保证车辆的侧向位移,防止侧向位移过小(不能进入车道),防止侧向位移过大(超出车道边界线).

第 3 阶段是稳定阶段,从 t_2 开始结束时间不限,该阶段是降低车辆的横摆角速度,车道保持的过程^[19].

将紧急变道分为上述 3 个阶段规划车辆侧向位移轨迹,将其转换为最优控制问题. 采用高斯维普法计算该最优化问题,并采用 GPOPS 软件进行求解. 自然驾驶测试车型为沃尔沃 S60, $L_f = 2.5$ m, $L_r = 2.7$ m, $w = 2.0$ m, 方向盘与转动轮之间的转速比

$i_{st}=16.25$,不足转向系数 0.003 ;车道宽度 $Y_{ref}=3.5$ m;道路状态良好摩擦系数 $\mu=0.8$,最大侧向加速度 $a_{y,max}=\mu g$;最大方向盘转速 $\dot{\delta}_t \leq 600^\circ \cdot s^{-1}$;安全距离为 $D_{sm}=0.1$ m.

随机选取两个紧急变道工况进行拟合分析,求解最优方程,参数如表 1 所示.通过轨迹模型可得车辆航向角、理想的驾驶员方向盘转角和方向盘转速.将车辆的拟合轨迹、拟合航向角、理想方向盘转角和

转速与实际的紧急转向操作进行比较,如图 5 和图 6 所示.

表 1 工况 A2260-59 和 A2211-22 的相关参数

Tab.1 Parameters of Case A2260-59 and A2211-22			
工况编号	车速/($km \cdot h^{-1}$)	TTC/s	侧向位移/m
A2260-59	30	2.1	3.52
A2211-22	77	3.0	3.54

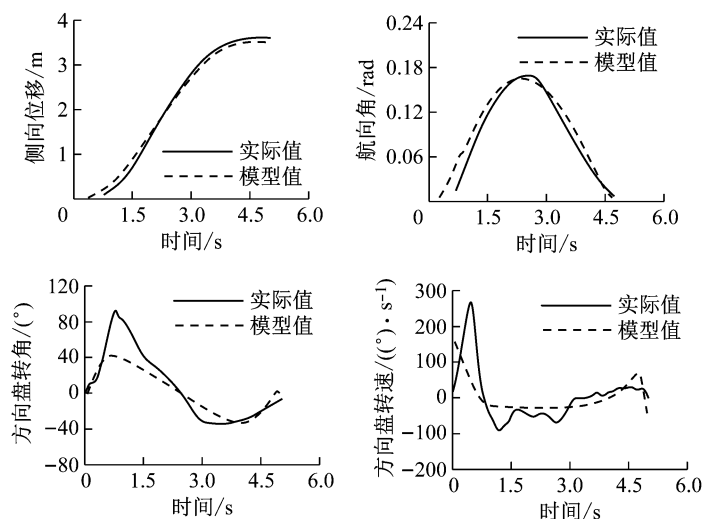


图 5 工况 A2260-59 的拟合结果

Fig.5 Fitting results of Case A2260-59

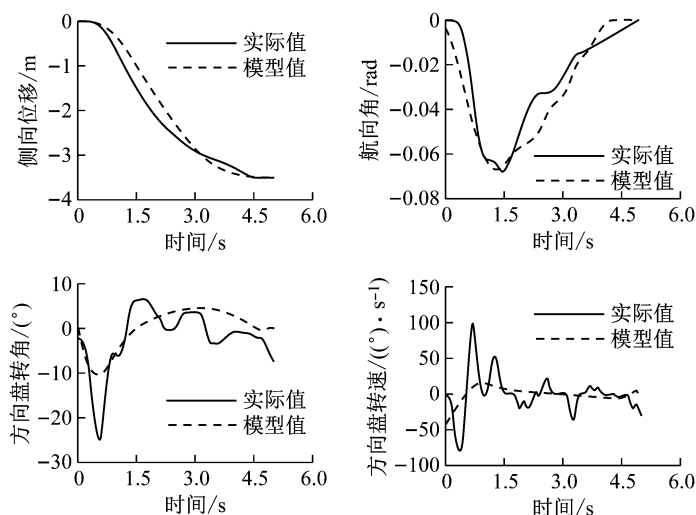


图 6 工况 A2211-22 的拟合结果

Fig.6 Fitting results of Case A2211-22

紧急变道侧向位移轨迹的模型拟合结果表明,该轨迹模型可准确描述驾驶员在紧急变道过程的变道侧向位移曲线,同时该模型也能很好地拟合车辆的航向角,车辆的侧向位移参数和航向角参数可作为驾驶员紧急转向模型的输入.

从上述比较结果可知,驾驶员在实际的紧急变

道过程中所使用的方向盘转角要比轨迹模型中得到的理想方向盘转角要大,结合自然驾驶工况的数据和视频可知,驾驶员在紧急转向操作时由于工况比较紧急,驾驶员通常会较大幅度地转动方向盘以避免碰撞的发生,与驾驶员正常变道有所不同,无法用理想模型来表征一般驾驶员的紧急转向操纵.

3 紧急变道驾驶员模型建立和分析

3.1 紧急转向变道避撞阶段的行为分析

驾驶员进行转向过程中,与转向目标点的角度偏差以及角度变化率是驾驶员的视觉信息感知源,驾驶员转向控制所需获得的视觉信息包含了远、近两个区域.如图 7 所示,近点距离车辆前端较近,驾驶员通过近点区域来控制车辆的侧向位移,近点控制产生的方向盘转速峰值较高;远点距离车辆前端较远,驾驶员通过远点区域来保持车辆的稳定,并感知路面的曲率变化情况,远点控制产生的方向盘转速峰值较低,且曲线平滑^[20].

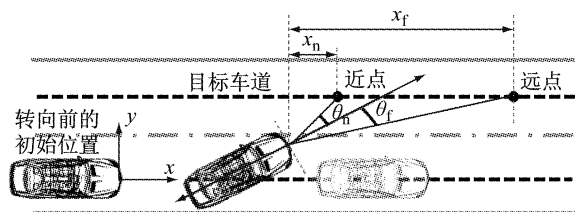


图 7 紧急转向变道的近点和远点

Fig.7 Far and near aimed point of emergency lane changing

在紧急转向变道阶段驾驶员通过远、近目标点的选择切换完成转向.在避撞、侧移阶段驾驶员方向盘转速幅值较大,驾驶员通过近点来控制车辆的侧向位移;在避撞阶段,驾驶员选择的近点与本车前端水平距离为两车的初始距离,以此控制车辆的转向避免碰撞的发生;在侧移阶段,驾驶员选择的近点与本车前端的水平距离为 6~10 m^[10,20],以此控制车辆的转向确保车身进入目标车道;在稳定阶段,驾驶员总体上转向控制更平滑,驾驶员通常选择与本车前端的水平距离为 80~150 m^[10,20]的远点来控制车辆保持在目标车道内,并保证车辆的稳定.

3.2 基于近、远目标点的紧急转向模型建立

3.2.1 避撞和侧移阶段分析

驾驶员通过目标近点来控制车辆转向.以车辆变道前转向初始位置车辆前端的中点作为坐标的原点,纵向行驶方向为 x 轴,侧向位移方向为 y 轴,向左转向为正.在此忽略驾驶员在车内的位置误差,本车前端中点的坐标为 $C(X_C, Y_C)$,目标近点坐标为 $O_n(X_{O_n}, Y_{O_n})$,车辆行驶方向与目标近点 O_n 角度差为

$$\theta_n = \arctan \frac{Y_n}{X_n} - \varphi \quad (8)$$

式中: θ_n 为车辆位置与近点 O_n 的角度偏差; $X_n = X_{O_n} - X_C$; $Y_n = Y_{O_n} - Y_C$; X_n 表示近点距离车前端的水平距离,在避撞和侧移阶段取值不同,在避撞阶段 X_n 选取为两车之间的距离,在侧移阶段选取 $X_n = 10$ m; 本文选取的自然驾驶工况是在城市路况下,根据道路宽度的国家标准 $Y_{O_n} = 3.5$ m (如车辆未行驶在车道中心线,则根据实际情况选取).

驾驶员通过车辆与目标近点的位置角度偏差以及角度偏差的变化率来控制转向,故所需方向盘转速 $\dot{\delta}_f$ 如下式:

$$\dot{\delta}_f = k_{np}\dot{\theta}_n + k_{ni}\theta_n \quad (9)$$

式中: k_{np} 、 k_{ni} 均为增益参数,对于每个驾驶员都有所不同,表征了驾驶员对于车辆和环境的综合感知程度,在避撞和侧移阶段取值也有所变化,优化范围为 0~50^[10].

3.2.2 稳定阶段远点的选择分析

本车前端中点坐标 $C(X_C, Y_C)$,目标远点坐标为 $O_f(X_{O_f}, Y_{O_f})$,车辆行驶方向与目标远点间的角度差为

$$\theta_f = \arctan(Y_f/X_f) - \varphi \quad (10)$$

式中: $X_f = X_{O_f} - X_C$, $Y_f = Y_{O_f} - Y_C$; X_f 表示了远点距离车前端的水平距离;同样根据道路宽度的国家标准 $Y_{O_f} = 3.5$ m. 驾驶员通过与目标远点的角度变化率来控制转向,所需方向盘转速 $\dot{\delta}_f$ 如下式:

$$\dot{\delta}_f = k_f\dot{\theta}_f \quad (11)$$

式中: k_f 为增益参数.

稳定阶段的 X_f 区间范围是 80~150 m^[10,20],在此为了避免模型复杂化,选取稳定阶段的 $X_f = 123$ m;增益参数 k_f 优化范围为 0~50^[10].

利用 MATLAB 中的优化工具箱,采用非线性多变量函数的极小值优化方法对驾驶员模型进行求解,优化目标是方向盘转角和方向盘转速的操作与实际驾驶员的方向盘转速和转角拟合度.

随机挑选 3 个紧急转向变道的危险工况,表 2 为该危险工况的本车、环境以及拟合参数,图 8~10 为 3 个紧急转向变道工况的拟合情况.

表 2 紧急变道工况的参数表

Tab.2 Parameters of emergency changing cases							
工况编号	车速/ (km · h ⁻¹)	TTC/ s	避撞		侧移		稳定
			k_{np1}	k_{ni1}	k_{np2}	k_{ni2}	
A2260-59	30	2.1	0	3.0	5.6	0	1.6
A2176-24	42	3.4	0	2.4	4.0	1.6	2.0
A2211-22	77	3.4	0	2.5	2.8	0.5	1.0

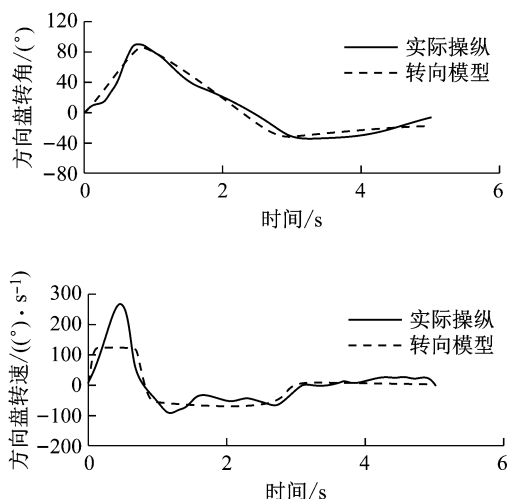


图 8 工况 A2260-59 转向模型拟合结果

Fig.8 Fitting results of Case A2260-59

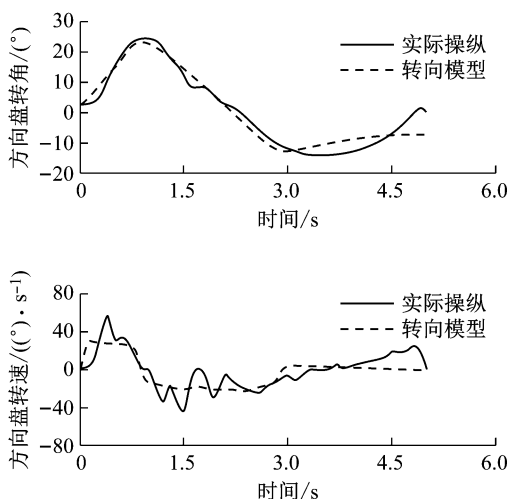


图 9 工况 A2176-24 转向模型拟合结果

Fig.9 Fitting results of Case A2176-24

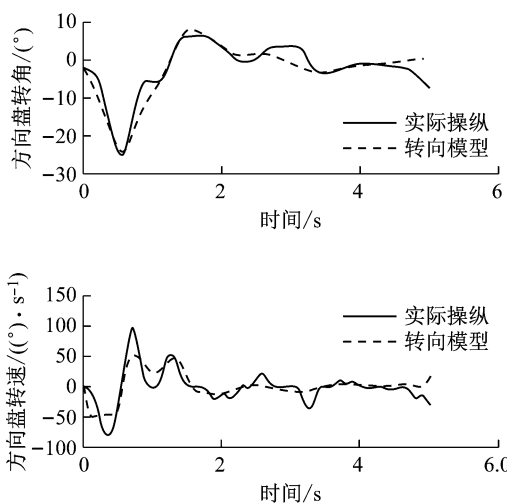


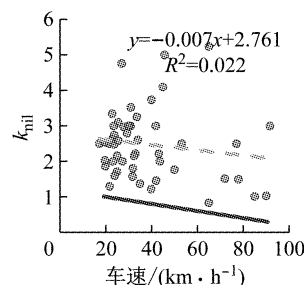
图 10 工况 A2211-22 转向模型拟合结果

Fig.10 Fitting results of Case A2211-11

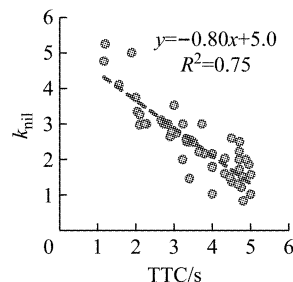
4 紧急转向变道行为特征

对 50 例驾驶员紧急转向变道操作进行参数拟合,近、远目标点的紧急转向变道连续模型方向盘转角拟合度比方向盘转速拟合度要高,方向盘转角拟合度平均值大于 0.8,方向盘转速拟合度平均值大于 0.5. 分析转向模型的近、远点增益因子的分布,以及驾驶员紧急转向变道的特征.

图 11 是避撞阶段增益因子 k_{nl} 随车速分布情况, k_{nl} 与车速并不显著相关,但随本车速度的增大有呈现减小的趋势. k_{nl} 增益因子值越小,避撞阶段的方向盘转角和转速幅度越小,即本车车速越高方向盘转角与转速峰值越低,与从自然驾驶数据库驾驶特征分析中得到的规律相符. 图 11 中实线为正常变道中拟合的增益因子 k_{nl} 随车速变化的线性关系曲线,可明显发现紧急变道过程驾驶员的增益因子 k_{nl} 相对于正常变道取值偏大.

图 11 k_{nl} 随车速的分布Fig.11 k_{nl} distribution with speed

在紧急转向变道避撞阶段中受碰撞时间 TTC 的影响较大,变道工况越紧急,驾驶员的操纵就越剧烈. 图 12 是避撞阶段增益因子 k_{nl} 随 TTC 分布情况,随着 TTC 减小,增益因子 k_{nl} 逐渐增加,且两者显著线性相关. 由于紧急变道中的 TTC 小于 5 s,故 k_{nl} 大于 1.0. 利用皮尔森检验方法,对避撞阶段的增益因子 k_{nl} 与 TTC、行车车速之间的关系进行分析,表明 k_{nl} 与 TTC 在 95% 置信区间内显著相关,而与

图 12 k_{nl} 随 TTC 的分布Fig.12 k_{nl} distribution with TTC

行车车速并不显著相关。

利用皮尔森检验方法,分析侧移阶段的增益因子 k_{np2} 、 k_{ni2} 的关系, k_{np2} 与本车的行驶车速有较强的相关性,与 k_{ni2} 也有较显著的相关性。两者与 TTC 并不显著相关,在侧移阶段转向的主要目的是保证车辆顺利进入目标车道, k_{np2} 、 k_{ni2} 主要与车辆动力学性能相关。图 13、图 14 是侧移阶段增益因子 k_{np2} 、 k_{ni2} 随车速分布情况, k_{np2} 、 k_{ni2} 与行驶车速显著相关,随本车速度的增大有呈现减小的趋势, $k_{np2} \geq 1.0$, $k_{ni2} \geq 0$ 。与避撞阶段类似,增益因子 k_{np2} 、 k_{ni2} 值越小,侧移阶段的方向盘转角和转速幅值越小,即车速越高方向盘转角与转速峰值越低,与从自然驾驶数据库驾驶特征分析中得到规律相符。

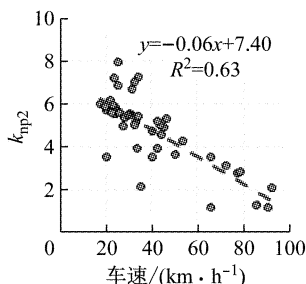


图 13 k_{np2} 随车速的分布

Fig. 13 k_{np2} distribution with speed

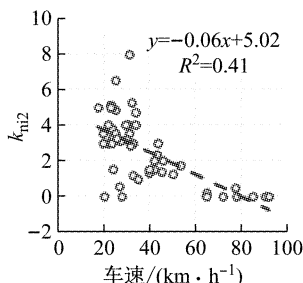


图 14 k_{ni2} 随车速的分布

Fig. 14 k_{ni2} distribution with speed

图 15 是侧移阶段增益因子 k_{np2} 与 k_{ni2} 相互关系的分布图,随着 k_{np2} 的增大,增益因子 k_{ni2} 逐渐增大,且两者显著线性相关。

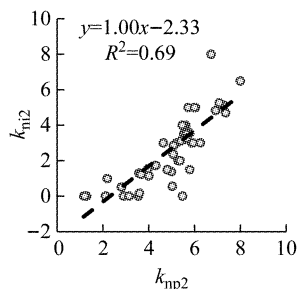


图 15 k_{np2} 随 k_{ni2} 的分布

Fig. 15 k_{np2} distribution with k_{ni2}

图 16 是稳定阶段增益 k_f 与车速的分布情况,稳定阶段转向的作用是使车辆保持最小的横摆角速度,保持车辆在车道内稳定行驶。实际驾驶中,该阶段驾驶员操作与驾驶风格密切相关。

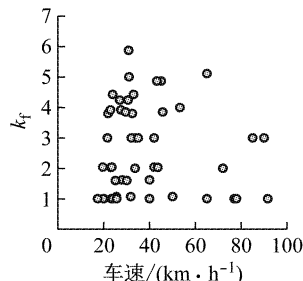


图 16 k_f 随车速的分布

Fig. 16 k_f distribution with speed

避撞阶段增益因子 k_{ni1} 与碰撞时间 TTC 显著相关,侧移阶段增益因子 k_{np2} 与行车车速显著相关,而增益因子 k_{ni2} 和 k_{np2} 相关,故在此可通过线性拟合关系得到避撞阶段和侧移阶段的驾驶员转向模型的增益参数表达。

$$\begin{cases} k_{np1} = 0 \\ k_{ni1} = -0.8t_{TTC} + 5.0, t_{TTC} < 5.0 \text{ s} \\ k_{np2} = \max\{-0.06V + 7.0, 1\} \\ k_{ni2} = \max\{k_{np2} - 2.33, 0\} \end{cases} \quad (12)$$

式中: t_{TTC} 为碰撞时间 TTC。

式(12)表征了驾驶员紧急变道转向模型增益参数的平均分布表达。

5 结论

本文提出了紧急转向变道的驾驶侧向运动轨迹的规划方法,通过二自由度单轨模型和高斯伪谱法求解最优控制问题,得到了驾驶员紧急转向避撞的侧向运动轨迹。验证结果表明,该规划方法能够较好地拟合驾驶员紧急转向变道的侧向运动轨迹。

通过驾驶员的紧急转向特征,分析了驾驶员在紧急转向变道各阶段的远、近目标点的选择,基于远、近目标点理论,建立了紧急转向变道工况的驾驶员转向模型。对 50 例紧急转向变道模型进行了拟合验证。对避撞、侧移和稳定阶段的增益因子的分布特征进行了研究,避撞阶段的增益因子 k_{ni1} 与碰撞 TTC 显著相关,侧移阶段的增益因子 k_{ni2} 和 k_{np2} 与车速显著相关,通过线性拟合建立了参数之间的计算模型。本文建立的紧急转向模型能够真实地预测自然驾驶中的紧急转向变道行为。

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]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D 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] 李霖,朱西产,陈海林. 驾驶员制动和转向避撞极限[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(11):1743.
LI Lin, ZHU Xichan, CHEN Hailin. Drivers' collision avoidance limit by braking and steering[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2016, 44(11):1743.
- [5] FAUSTEN M. Accident avoidance by evasive maneuvers [R]. 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*. Washington D C:IEEE, 2011:56-61.
- [7] CHOVAN J D, TIJERINA L, ALEXANDER G, *et al.* Examination of lane change crashes and potential IVHS countermeasures[R]. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 1994.
- [8] BASCUNANA J L. Analysis of lane change crash avoidance[C] // *SAE International Future Transportation Technology Conference & Exposition*. Costa Mesa: National Highway Traffic Safety Administration. 1995:33-38.
- [9] NELSON W. Continuous-curvature paths for autonomous vehicles[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Scottsdale: IEEE, 1989:1260-1264.
- [10] Markkula G, Benderius O, Wahde M. Comparing and validating models of driver steering behavior in collision avoidance and vehicle stabilization [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(12):1658.
- [11] SALVUCCI D D, GRAY R. A two-point visual control model of steering[J]. *Perception*, 2004, 33(10):1233.
- [12] 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.
- [13] BENDERIUS O, MARKKULA G. Evidence for a fundamental property of steering[C] // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Goteborg: SAGE Publications, 2014:884-888.
- [14] BENDERIUS 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.
- [15] BENDERIUS O. Modelling driver steering and neuromuscular behavior [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
- [16] 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.
- [17] GALVANI M. Optimal control based ADAS for driver warning and autonomous intervention using maneuver jerks for risk assessment [D]. Trento:University of Trento, 2013.
- [18] BRANNSTROM M, COELINGH E, SJOBERG J. Model-based threat assessment for avoiding arbitrary vehicle collisions[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3):658.
- [19] MORASSO P. Spatial control of arm movements [J]. *Experimental Brain Research*, 1981, 42(2):223.
- [20] 吴斌,朱西产,沈剑平,等. 自然驾驶工况的驾驶员紧急转向变道行为[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4):554.
WU Bin, ZHU Xichan, SHEN Jianping, *et al.* Analysis of driver emergency steering lane changing behavior based on naturalistic driving data [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(4):554.