

# 紧急避撞路径规划及其跟踪驾驶员转向模型

赵治国, 胡昊锐, 周良杰, 王 凯, 冯建翔

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 针对紧急避撞工况, 提出并设计了一种紧急避撞路径规划方法和路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型。首先, 提出了一种基于 Sigmoid 曲线与物理约束的避撞路径规划方法, 并建立融合最优曲率预瞄与闭环反馈转向修正的驾驶员模型以对规划路径实现快速和精确跟踪。之后, 搭建了 CarSim+Simulink 离线联合仿真平台, 对避撞路径规划和路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型的有效性进行了验证。最后, 基于自主改装的试验车辆, 进行实车试验以验证所提出的路径规划方法及驾驶员模型的可行性与实时性。仿真及实车试验结果均表明, 所规划的避撞路径和驾驶员模型可以控制车辆快速、安全地避让障碍物。

**关键词:** 紧急避撞工况; 路径规划; 驾驶员模型; 联合仿真; 实车试验

**中图分类号:** U461.6

**文献标志码:** A

## Emergency Collision Avoidance Path Planning and Driver Steering Tracking Model

ZHAO Zhiguo, HU Haorui, ZHOU Liangjie, WANG Kai, FENG Jianxiang

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** For the emergency collision avoidance condition, a new method of path planning and a path tracking feedback preview driver model were proposed and designed. Firstly, a collision avoidance path planning method based on Sigmoid curve and physical limitation was proposed, and a driver model combined with optimal curvature preview and closed-loop feedback steering correction was established to achieve the fast and precise tracking of the planned path. Then, the effectiveness of the collision avoidance path planning and the path tracking feedback preview driver model was verified by CarSim+Simulink offline co-simulation

platform. Finally, based on the self-modified test vehicle, a real vehicle test was carried out to verify the feasibility and real-time of the proposed path planning method and driver model. Both the simulation and real vehicle test results show that, the planned path and driver model for collision avoidance can control the vehicle to avoid obstacles quickly and safely.

**Key words:** emergency collision avoidance condition; path planning; driver model; co-simulation; real vehicle test

近年来,碰撞在高速公路交通事故中的比例居高不下,其中40.3%为车辆追尾碰撞,21.9%为车辆与静止物体碰撞;54%的驾驶员在危险情况下采取了紧急避撞动作<sup>[1]</sup>。紧急避撞转向辅助系统<sup>[2]</sup>可以减少碰撞事故的发生率,提高车辆的主动安全性<sup>[3]</sup>。该系统利用雷达等传感器获取外界环境信息并传递给电控单元,在紧急工况下通过转向执行器产生转向<sup>[4]</sup>使车辆稳定地沿着规划路径行驶,以避免碰撞交通事故的发生。因此合理的路径规划以及路径跟踪用驾驶员模型直接影响无人驾驶智能车辆的行驶安全性。

避撞路径规划方法按照建模机理的不同,可以分为数学公式描述法<sup>[5]</sup>、遗传算法<sup>[6]</sup>和人工势场法<sup>[7]</sup>等。Hidehisa等<sup>[8]</sup>使用数学公式描述法进行车辆局部路径规划,其计算量小且实用性强,因此被广泛应用于自动驾驶汽车的路径规划中。传统的五次多项式避撞路径模型,常将车辆横向位移对时间求导,并结合换道边界条件以确定多项式系数,但多项式系数值与路径形状之间无明确物理意义,对避撞物理约束考虑不足。Fan等<sup>[9]</sup>使用遗传算法进行动态路径避撞规划,避免了复杂的理论推导,可直接获得避撞路径最优解,但运算时间长,难以实现实时规划。

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1564208)

第一作者: 赵治国(1971—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为新能源汽车动力系统集成控制与优化、新型传动装置控制、车辆动力学控制。E-mail: zhiguo Zhao@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

人工势场法被广泛应用于无人机及移动机器人的路径规划<sup>[10]</sup>,其将物体的运动视为一种虚拟的在人工受力场中的运动,结构简单,实时性强,便于动态局部控制。针对传统人工势场法存在的局部最小值及目标不可达的问题,许多国内外学者也提出了改进势场函数<sup>[11-12]</sup>、结合搜索算法<sup>[13]</sup>等解决方法。但改进后的人工势场法仍属于虚拟力法,多数参数实际物理意义不明确并需要长时间标定,这给实时动态调节避撞路径参数带来不便;且其多将被控车辆简化为质点,较少考虑车辆尺寸范围及边界环境的影响。此外,结合搜索方法的改进人工势场法规划效率较低,实时性差,对紧急避撞路径规划问题适用性不足。在紧急避撞工况下,碰撞时间(time to collision, TTC)<sup>[14]</sup>与驾驶员反应时间会直接影响换道快慢程度、换道起始时刻等,这就要求在不同的TTC下规划相应的避撞路径。基于Sigmoid曲线的避撞路径规划方法作为一种特殊的数学公式描述法,其参数物理意义更加明确,且考虑了更为复杂的约束条件,不仅具有计算简单和实时性强的特点,而且其参数与物理避撞极限及碰撞时间TTC密切相关,可以满足规划路径对避撞安全性、快速性的要求。

驾驶员模型<sup>[15]</sup>按建模方式不同可以分为根据人类神经系统特性建立的传递函数模型和预瞄驾驶员模型。由于传递函数中参数无法准确获得,不易应用于文中所研究的紧急避撞工况。预瞄驾驶员模型由于可集成驾驶员行为与车辆轨迹优化,适用于无人驾驶车辆路径跟踪研究<sup>[16]</sup>。预瞄驾驶员模型<sup>[17]</sup>中常用的路径跟踪控制方法有PID控制,模型预测控制,前馈-反馈控制等。戚志锦等<sup>[18]</sup>使用PID方法控制车辆行驶状态偏差,以实现车辆对期望路线的精确跟踪,但初始加速度突变会影响车辆跟踪效果和稳定性,不适用于紧急避撞工况。Shim等<sup>[19]</sup>以前轮主动转向为控制对象,使用模型预测法设计路径跟踪驾驶员模型,但未考虑车辆横向加速度,使车辆有较强的速度突变。为此,基于前馈-反馈控制,本文提出一种改进型驾驶员模型,融合最优曲率预瞄与闭环反馈修正,在已知前方道路曲率信息的情况下提高车辆路径跟踪精度,并通过CarSim+Simulink软件联合仿真与实车试验对基于Sigmoid曲线的路径规划方法与改进型驾驶员转向模型的有效性进行验证。

## 1 基于Sigmoid函数的路径规划方法

为了避免规划路径产生阶跃或曲率不连续等问题,结合Sigmoid函数计算简单与实时性好的优点,采用Sigmoid函数结合避撞物理约束,规划避撞路径。

### 1.1 Sigmoid函数公式及其参数物理意义

Sigmoid曲线其数学描述公式为

$$y = \frac{d}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $c$ 、 $d$ 为曲线形状参数。参数 $a$ 、 $c$ 、 $d$ 在曲线中的物理含义如图1所示。

(1)参数 $a$ :对式(1)求导,易得转向路径的斜率的最大值为 $ad/4$ 。在参数 $d$ 一定时,参数 $a$ 决定了曲线的倾斜程度, $a$ 越大则避撞转向行为越剧烈。

(2)参数 $c$ :物理含义为斜率最大值对应的纵向位置,当 $c$ 为 $x_d/2$ 时,其路径轨迹为图1曲线①,当 $c$ 小于 $x_d/2$ 时,曲线前移,如图1中曲线②,当 $c$ 大于 $x_d/2$ 时,紧急转向点后移,如图1中曲线③。 $x_d$ 为换道过程车辆的纵向位移。

(3)参数 $d$ :物理含义为避撞路径横向目标位移值,由本车自身宽度、目标障碍物宽度与安全距离构成,其物理定义如图2所示。

$$d = \frac{W_{\text{self}}}{2} + \frac{W_{\text{obj}}}{2} + d_{\text{safe}} \quad (2)$$

式中: $W_{\text{self}}$ 为车身宽度; $W_{\text{obj}}$ 为目标障碍物宽度; $d_{\text{safe}}$ 为安全距离。

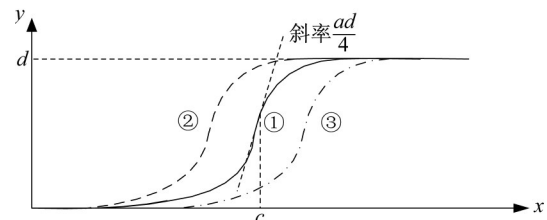


图1 避撞路径Sigmoid曲线参数含义

Fig.1 Parameter meaning of the Sigmoid curve of the collision avoidance path

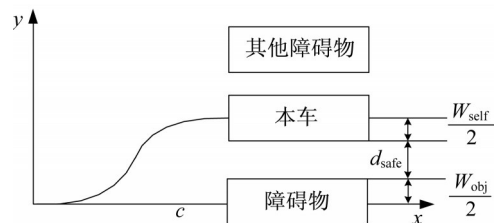


图2 避撞横向目标位移

Fig.2 Lateral displacement of the collision avoidance target

基于以上分析,当确定 $a$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $x_d$ 后,即可通过式(1)确定车辆避撞目标路径。

## 1.2 Sigmoid函数参数确定方法

基于式(2),由障碍物宽度、本车宽度与安全间距可首先确定横向位移 $d$ 。

将碰撞前时间分为安全、预警、辅助刹车、自动刹车、辅助转向与自动转向6个阶段,如图3所示。开始转向辅助时刻称为TTSS(time to support steering),开始自主转向的时刻称为TTAS(time to automatic steering)。

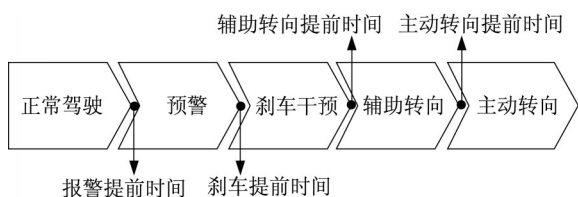


图3 碰撞时间分段策略

Fig.3 Strategy of collision time segmentation

较大的TTAS值使转向更加平稳,但过早进入自动转向容易使驾驶员产生意外感,降低驾驶员对系统的信任度。TTAS值过小使转向剧烈,侧向加速度较大使车辆易进入失稳区间,驾驶员易产生恐慌诱发错误转向动作。因此TTAS值的选择应适中,同时考虑转向物理机构最大转角限制和驾驶员输入最大转速。由于紧急转向发生时间很短,在此时间内,假设车辆的速度变化很小,可忽略不计。因此纵向距离 $x_d$ 可以近似计算为

$$x_d = v_x t \quad (3)$$

式中: $v_x$ 为车速; $t$ 为避撞路径规划时对应的碰撞时刻, $t$ 大于主动转向提前时间。

以障碍物中心为圆心,安全距离 $R$ 为半径画圆作为安全区域,绘制极限避撞路径规划如图4所示。可以看出, $a$ 同时反映了车辆避撞航向角大小, $a$ 越小,曲线各处转弯半径越大,对应的方向盘转角越小,转向负荷越低,越容易被驾驶员接受。车辆与障碍物之间的距离越大,则避撞安全性越高。要满足此要求,参数 $a$ 与 $c$ 应取最小值,但参数 $c < x_d/2$ 时, $a$ 增加,因此斜率 $a$ 取最小值 $a_{\min}$ 时,理想参数 $c > x_d/2$ ,基于图4中几何关系,可得

$$\sin(\arctan(\frac{a_{\min}d}{4})) = \frac{x_d + R - c}{R + S + W/2} \quad (4)$$

式中: $S$ 为本车与障碍物安全距离; $W$ 为本车宽度。

斜率 $a$ 取最小值 $a_{\min}$ 时,要求在纵向位移到达障碍物时完成避撞路径横向位移大于一定百分比,则 $a_{\min}$ 可基于式(5)计算得出。

$$\frac{d}{1 + e^{-a_{\min}(x_d - c)}} = k \quad (5)$$

式中: $k$ 为障碍物位置对应的横向位移,一般取 $0.8d \sim 0.9d$ 。

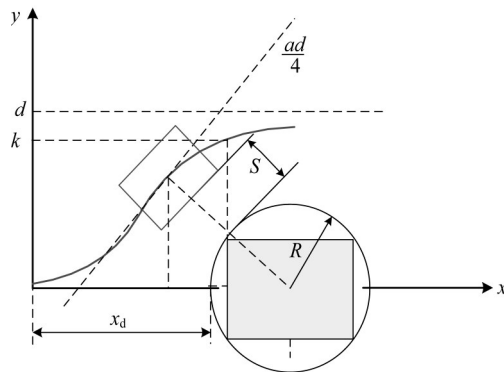


图4 碰撞极限斜率

Fig.4 Limit slope of the collision

## 2 预瞄驾驶员模型

为了跟踪所规划的避撞路径,建立了融合最优曲率预瞄与闭环反馈修正的驾驶员转向模型。

### 2.1 车辆动力学模型

文中采用七自由度车辆模型,主要考虑纵向、横向和横摆运动。在车辆坐标系下的车辆受力分析如图5所示。图5中轮胎纵向力为 $F_{xi}$ ,轮胎横向力为 $F_{yi}$ ,回正力矩为 $M_{zi}$ 。前后轴轮距分别为 $d_1$ 与 $d_2$ ,并假设两者一致,记为 $d$ 。车辆轴距记为 $L'$ 。车辆模型基于如下假设:左前轮与右前轮转角相同,车辆重心位置未发生变化,同时忽略了车辆仰俯运动与空气阻力。车辆动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \gamma v_y + \frac{1}{m} [(F_{x1} + F_{x2}) \cos \delta_f - (F_{y1} + F_{y2}) \sin \delta_f + F_{x3} + F_{x4}] \\ \dot{v}_y = -\gamma v_x + \frac{1}{m} [(F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f + F_{y3} + F_{y4}] \\ \dot{\gamma} = \frac{1}{I_z} \{ [(F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta_f + (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta_f] l_f - [(F_{x1} - F_{x2}) \cos \delta_f - (F_{y1} - F_{y2}) \sin \delta_f] \frac{d}{2} - (F_{x3} - F_{x4}) \frac{d}{2} - (F_{y3} + F_{y4}) l_r \} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\delta_f$ 为前轮转角; $\gamma$ 为车辆横摆率; $l_f$ 与 $l_r$ 分别为重心距前后轴距离; $v_x$ 与 $v_y$ 为纵向与横向车速; $m$ 为车辆质量; $I_z$ 为车辆绕 $Z$ 轴转动惯量。车轮 $Z$ 轴向载荷方程与车轮力矩平衡方程已有相关研究给出<sup>[20]</sup>,



此处不再列出。

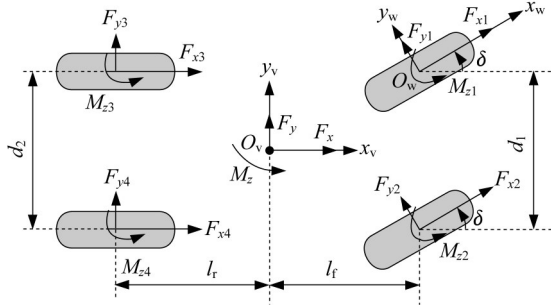


图5 车辆七自由度模型

Fig.5 7 Degree-of-freedom vehicle model

## 2.2 路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型

根据“预瞄跟随”理论,预瞄最优曲率驾驶员模型认为驾驶员总是想通过最优曲率行驶后到达预瞄点横向误差为零,即

$$y(t + \Delta t) = f(t + \Delta t) \quad (7)$$

在预瞄点处的横向位置为

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \Delta t v_y(t) + \frac{1}{2} \Delta t^2 a_y(t) \quad (8)$$

当车辆做低速稳态圆周运动时

$$a_y(t) = v^2 / R_c \quad (9)$$

式中: $R_c$ 为汽车转弯半径; $v$ 为车辆质心速度; $a_y$ 为车辆横向加速度。

预瞄距离记为 $L$ ,有

$$L = v \Delta t \quad (10)$$

由阿克曼转角<sup>[21]</sup>几何关系有

$$\delta = L' / R \quad (11)$$

可得到基于最优曲率的前馈方向盘转角为

$$\delta_{ffw} = \frac{2L'}{d^2} [f(t + \Delta t) - y(t) - \Delta t v_y(t)] \quad (12)$$

预瞄最优曲率的驾驶员模型基于阿克曼转角几何关系,但其未考虑车辆的动态特性,且未考虑在预瞄点处的航向误差。

文中所研究的紧急避撞工况为车速较高且转角较大的工况。因此,在最优曲率预瞄基础上,下文从驾驶员的预测与实时修正两方面入手:一方面沿用最优曲率预瞄所产生的前馈;另一方面基于驾驶员的闭环反馈所产生转向修正,提出了一种路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型,其结构如图6所示。

将车辆当前位置的横向位置误差与航向误差分别记为 $e_y, e_\psi$ ,则

$$\begin{cases} \dot{e}_y = v_y + v_x(\psi - \psi_d) \\ \ddot{e}_y = a_y + v_x(\dot{\psi} - \dot{\psi}_d) \\ e_\psi = \psi - \psi_d \end{cases} \quad (13)$$

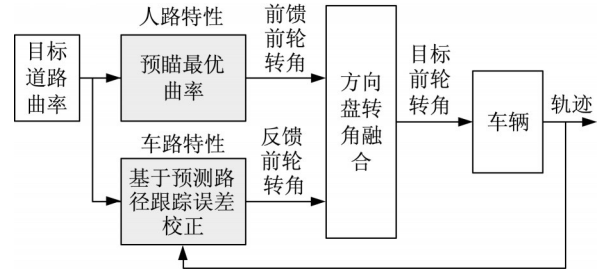


图6 路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型结构

Fig.6 Structure of the driver model of path tracking with feedback and preview

式中: $\psi$ 为车辆当前航向位置; $\psi_d$ 为车辆理想航向位置。

基于高速下小转角、轮胎工作在线性区域且左右轮轮胎力相同的假设,轮胎力方程为

$$\begin{cases} F_{yf} = 2C_{af}\theta_f \\ F_{yr} = 2C_{ar}\theta_r \end{cases} \quad (14)$$

式中: $F_{yf}$ 与 $F_{yr}$ 分别为前后轮胎所受横向力; $C_{af}$ 与 $C_{ar}$ 为前后轮胎侧偏刚度; $\theta_f$ 与 $\theta_r$ 为前后轮胎侧偏角。

基于转向几何关系,有

$$\begin{cases} \theta_f = \beta + l_f \gamma - \delta \\ \theta_r = \beta - l_r \gamma \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\beta$ 为车辆质心侧偏角; $\gamma$ 为车辆横摆角速度。

结合车辆模型(6)以及式(11)、(12)、(13),基于道路输入的路径跟踪模型如下:

$$\dot{X} = AX + B_1\delta + B_2\psi_d \quad (16)$$

$$Y = CX$$

式中: $X = [e_y, \dot{e}_y, e_\psi, \dot{e}_\psi]^T$ ;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{mv_x} & \frac{2C_{af} + 2C_{ar}}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2C_{af}l_f - 2C_{ar}l_r}{I_z v_x} & \frac{2C_{af}l_f - 2C_{ar}l_r}{I_z} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2C_{af}l_f + 2C_{ar}l_r}{mv_x} \\ 1 \\ -\frac{2C_{af}l_f^2 + 2C_{ar}l_r^2}{I_z v_x} \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{af}}{m} \\ 0 \\ \frac{2C_{af}l_f}{I_z} \end{bmatrix}; B_3 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2C_{af}l_f - 2C_{ar}l_r}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ -\frac{2C_{af}l_f^2 + 2C_{ar}l_r^2}{I_z v_x} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

驾驶员闭环反馈控制器的目标是在输入最小的情况下使横向位移跟踪误差与航向角误差最小,设计控制指标为

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} (a_1 e_y^2(k) + a_2 e_\psi^2(k) + a_3 \dot{e}_y^2(k) + a_4 \dot{e}_\psi^2(k) + r \delta_b^2(k)) \quad (17)$$

文中使用LQR最优控制器<sup>[22]</sup>得出最优的反馈前轮转角 $\delta_b$ 为

$$\arg \min \sum_{k=0}^{N-1} (e(k)^T Q e(k) + u(k)^T R u(k)) \quad (18)$$

式中:

$$Q = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 \end{bmatrix}$$

$$u = \delta_b$$

$$R = r$$

利用式(16)与式(18),最终的前轮转角可以通过融合预瞄最优曲率获得的前轮转角前馈 $\delta_{ffw}$ 与使路径跟踪误差最小的前轮转角反馈 $\delta_b$ 而获得,即

$$\delta = \zeta \delta_{ffw} + (1 - \zeta) \delta_b \quad (19)$$

$$\zeta = f(\phi_{des}, v) \quad (20)$$

式(19)、(20)中:系数 $\zeta$ 为基于最优曲率获得的前轮转角前馈的比例,其与道路曲率、车速成函数关系; $\phi_{des}$ 为道路曲率。由于预瞄最优曲率基于低速与小前轮转角,所以随着道路曲率减小与速度提高, $\zeta$ 减小,即采用由最优曲率获得的前轮转角前馈比例降低。

考虑驾驶员的延迟与滞后特性<sup>[23]</sup>,最终决策方向盘转角 $\delta_{sw}$ 由下式计算:

$$\delta_{sw}(s) = \frac{K e^{-T_d s}}{1 + T_h s} \delta(s) \quad (21)$$

式中: $K$ 为转向系传动系数; $T_d$ 为驾驶员反应时间; $T_h$ 为驾驶员惯性时间常数。

### 3 仿真验证

为了验证文中提出的路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型与Sigmoid函数避撞路径规划方法的有效性,在CarSim<sup>[24]</sup>和MATLAB/Simulink软件中搭建了联合仿真模型。车辆模型选用CarSim自带车辆,如图7所示,在CarSim界面中对车辆、试验场景、输入与输出进行配置,通过动画界面可对仿真结果进行观察。转向系统、路径规划与跟踪控制策略则在MATLAB/Simulink里面搭建完成,如图8所示。分

别对路径规划与路径跟踪进行了验证。

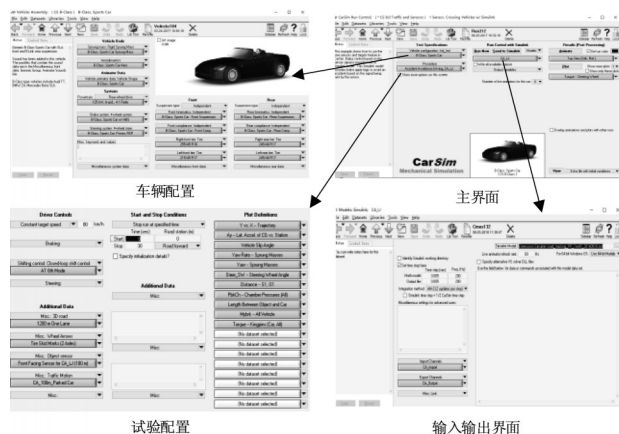


图7 CarSim软件界面

Fig.7 Software interface of CarSim

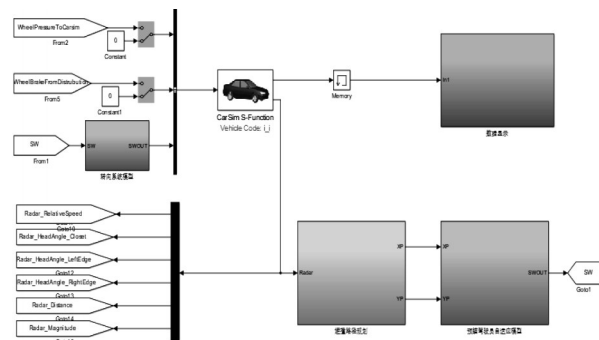


图8 CarSim/Simulink联合仿真界面

Fig.8 CarSim/Simulink co-simulation interface

基于雷达输出信息,分别就 $TTC=1.2$  s时的主动避撞路径与 $TTC=0.6$  s时的主动避撞路径进行规划,如图9所示,并在规划路径上画圆作为其避撞安全区域,障碍物位置及其安全区域也在图中画出。从图9中可以看出,一方面,主动紧急避撞时曲线斜率大,对应急促转向输入,避撞规划路径曲线斜率较小,转向平和,避撞路径规划符合紧急避撞驾驶工况需求;另一方面,从安全区域未重叠可以看出,碰撞并没有发生。图9中, $TTC=1.2$  s避撞路径对应曲线参数为 $a=0.3, d=3.5, c=80$ ;  $TTC=0.6$  s避撞路径对应曲线参数为 $a=0.4, d=3.5, c=85$ 。从仿真结果可以看出,采用Sigmoid型曲线规划的避撞路径调整参数小,物理意义明确,可根据不同避撞辅助控制触发时刻( $TTC$ )进行快速调节。

基于上述仿真平台,将 $TTC=1.2$  s情况下规划的避撞路径作为驾驶员模型跟踪目标,对建立的路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型进行仿真验证,车辆速度为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同预瞄距离下的车辆轨迹、横向位移误差、方向盘转角、横摆角速度分别如图10~13

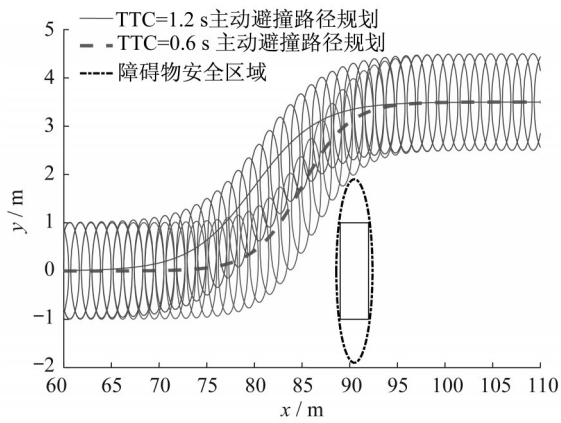


图9 避撞路径规划

Fig.9 Collision avoidance path planning

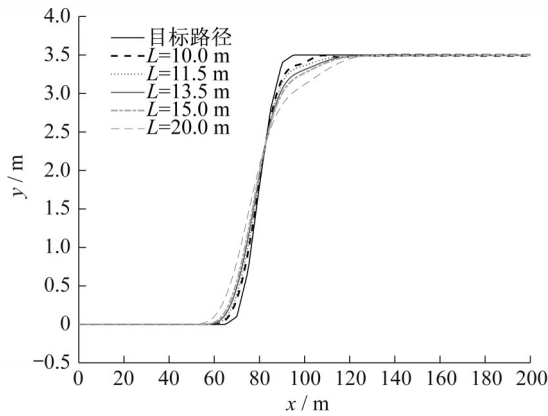


图10 车辆轨迹

Fig.10 Vehicle trajectory

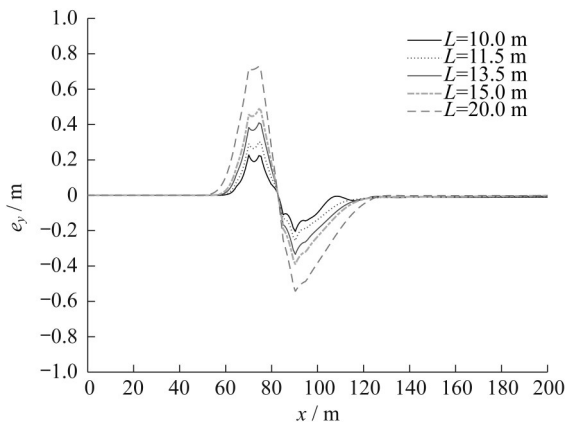


图11 横向位移跟踪误差

Fig.11 Tracking error of lateral displacement

所示。由图10~13可知,预瞄距离对路径跟踪误差、转向频度有直接关系。预瞄距离为10.0 m时,横向位移跟踪误差小于0.23 m,跟踪性能好,但方向盘来回摆动稳定性较差;预瞄距离为20.0 m时,跟踪误差较大,但稳定性好。合理选择预瞄距离为13.5 m

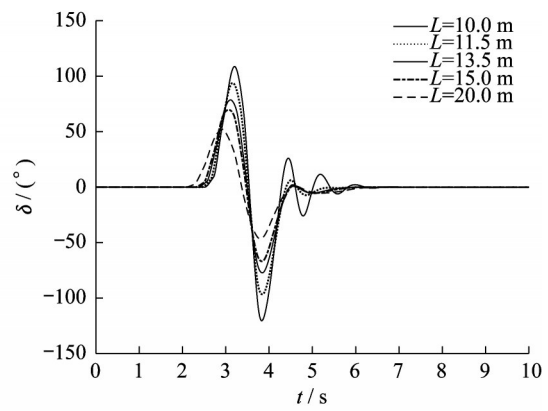


图12 方向盘转角

Fig.12 Steering angle

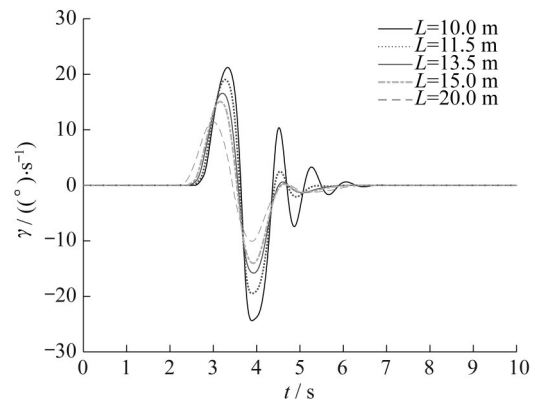


图13 横摆角速度

Fig.13 Yaw rate

时,跟踪误差小且横摆角速度小,车辆稳定性好。由此可以看出,合理选择预瞄距离或实现预瞄距离自适应具有实际应用意义。

为验证所提出的路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型相对于仅前馈控制的预瞄最优曲率驾驶员模型在控制性能上的提升,仍基于上述仿真设置,选取预瞄距离为13.5 m进行仿真对比试验,横向位移与航向角跟踪误差对比结果如图14、15所示。由图14、15可知,相对于仅前馈控制(虚线),加入反馈控制后(实线)最大横向位移误差由0.52 m降低至0.41 m,最大误差降低21.2%;最大航向角误差绝对值由6.15°降低至5.01°,最大误差绝对值降低18.5%,且超调量略有减小,收敛速度加快。综上,加入反馈控制的路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型相对于仅前馈控制的预瞄最优曲率驾驶员模型有着更优的控制性能。

## 4 实车验证

基于上述研究,为了进一步验证本文所提出的



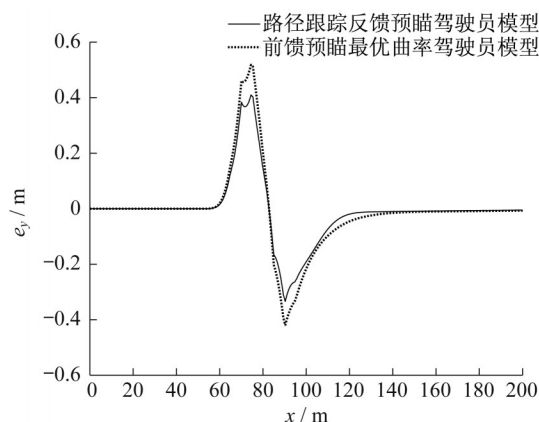


图 14 横向位移跟踪误差对比结果

Fig.14 Comparison of tracking error of lateral displacement

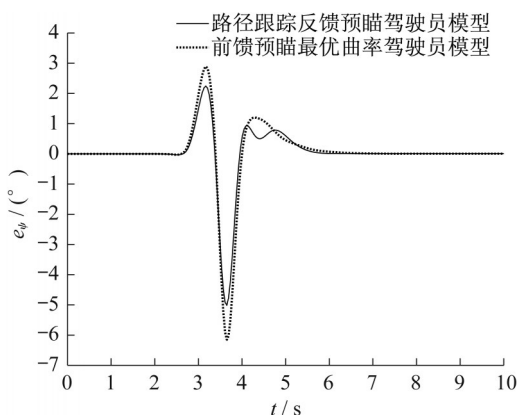


图 15 航向角跟踪误差对比结果

Fig.15 Comparison of tracking error of heading angle

紧急避撞路径规划方法及其跟踪驾驶员转向模型的可行性与实时性,在自主改装的试验车上进行实车试验。试验改装车如图 16 所示,其与传统汽车相比,加装了多种装置,如图 17 所示。驾驶员模型输出的方向盘转角可以通过主动转向辅助装置(图 18)作用于实车;试验车与前方障碍物的 TTC 由毫米波雷达实时监测;试验车的行驶路径由差分 GPS 进行记录。



图 16 试验车辆

Fig.16 Test vehicle

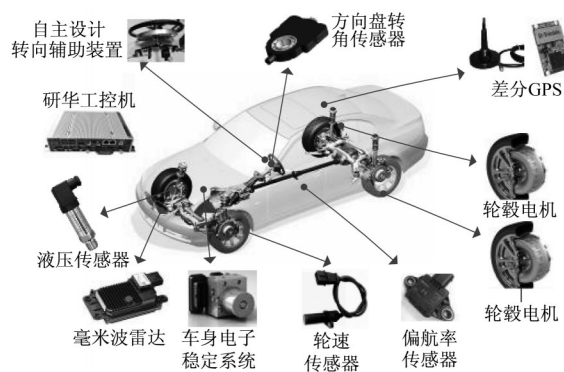


图 17 试验车附加装置

Fig.17 Additional equipment of the test vehicle



图 18 主动转向辅助装置

Fig. 18 Automatic steering auxiliary device



图 19 试验场景

Fig. 19 Test scenario

基于改装的试验车辆,试验场景设置如图 19 所示,在本车道前方放置路障,试验车以  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的车速迅速接近路障。将路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型与目标路径集成在 Labview 开发环境中, GPS 获取当前位置、速度与航向。基于毫米波雷达的返回数据实时计算 TTC, 当 TTC 小于  $1.2 \text{ s}$  时, 试验车进入紧急避撞状态, Labview 控制多功能数据采集卡 (data acquisition, DAQ) 发送脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 转向命令控制驱动器施加转角, 通过方向盘转角信号实现闭环控制, 从而跟踪目标路径, 以验证此时避撞规划路径的有效性以及试验车在路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型输出下的安

全性与稳定性。

基于上述试验方案,试验结果如图20~22所示。由路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型输出的方向盘转角如图20所示,可见试验车在15 s左右进入紧急避撞工况。车辆横向加速度如图21所示,避撞过程中横向加速度峰值为0.4g,车辆未出现失稳现象。车辆轨迹与障碍物位置如图22所示,虚线曲线为规划路径,实线曲线为实际路径,可见车辆避开了障碍物,未发生碰撞,且实际路径可实现目标路径跟踪。由于皮带传动张紧过程空行程,在初始时路径跟踪最大存在0.3 m误差,随后车辆轨迹与目标轨迹趋势相同。因此,所提出的避撞路径规划方法和路径跟踪反馈预瞄驾驶员模型可以控制车辆高精度地跟踪理想避撞路径,且安全性与稳定性较好。

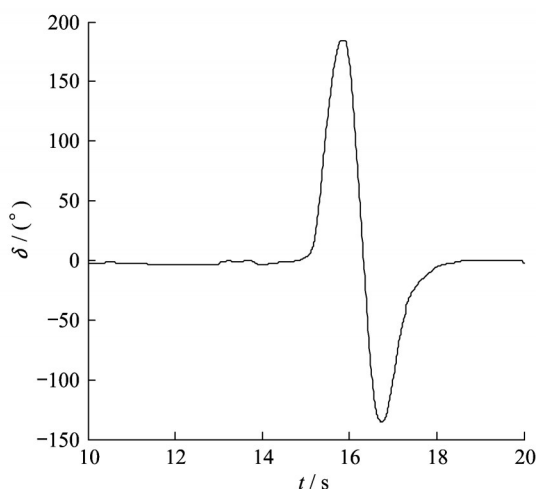


图20 方向盘转角

Fig. 20 Steering angle

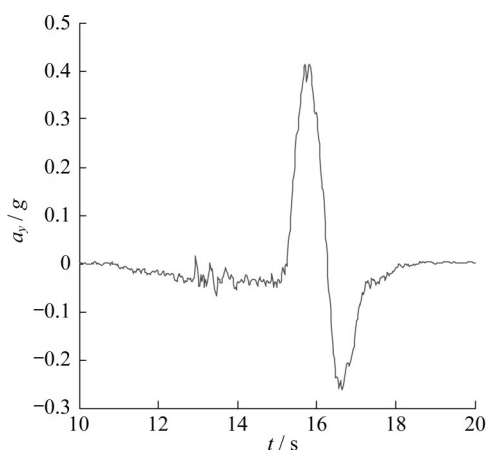


图21 横向加速度

Fig. 21 Lateral acceleration

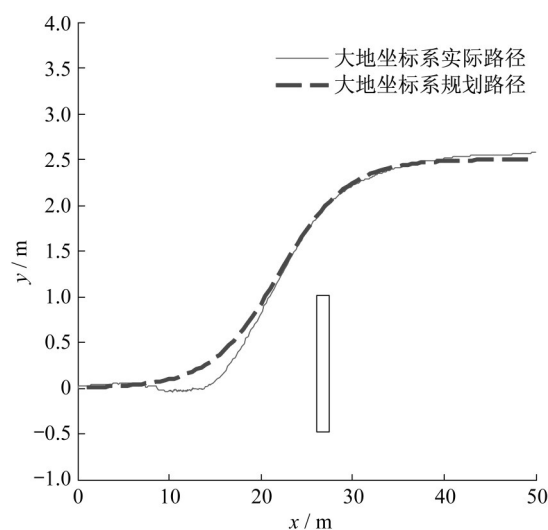


图22 车辆轨迹

Fig. 22 Vehicle trajectory

## 5 结论

论文基于Sigmoid函数曲线与避撞物理约束,结合碰撞时间TTC规划了避撞路径,并建立融合最优曲率预瞄与闭环反馈修正的驾驶员转向模型,以实现对所规划的避撞路径的精确跟踪。为了验证文中提出的路径规划方法与预瞄改进驾驶员模型,搭建了基于Carsim+Simulink软件平台的联合仿真模型并进行了仿真。结果表明,所规划的避撞路径与预瞄驾驶员模型可以控制车辆高精度地跟踪理想避撞路径,并快速、无碰撞、安全地避让障碍物,且转向频率和车辆稳定性均较好。实车试验验证了所提出的路径规划方法及预瞄改进驾驶员模型的有效性。

## 参考文献:

- [1] 朱西产,刘智超,李霖. 基于车辆与行人危险工况的转向避撞控制策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(3):217.  
ZHU Xichan, LIU Zhichao, LI Lin. Evasive manoeuvre for emergency steering based on typical vehicle-pedestrian use case [J]. Automotive Safety and Energy, 2015, 6(3):217.
- [2] WHYTE W. Handbook of intelligent vehicles [M]. London: Springer, 2012.
- [3] 徐友春,王荣本,李兵,等. 世界智能车辆近况综述[J]. 汽车工程, 2001(5):289.  
XU Youchun, WANG Rongben, LI Bing, et al. A summary of worldwide intelligent vehicle [J]. Automotive Engineering, 2001(5):289.
- [4] MASAO N. Perspectives of research for enhancing active safety based on advanced control technology [J]. Automotive Safety and Energy, 2010, 11(1):14.



- [5] EIDEHALL A, MADAS D. Real time path planning for threat assessment and collision avoidance by steering [C]// Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems. The Hague: IEEE, 2013:916-921.
- [6] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清. 基于遗传算法的移动机器人动态避障路径规划方法[J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(2):161.  
LI Qingzhong, GU Weikang, YE Xiuqing. Genetic path planning and dynamic obstacle avoidance for mobile robots[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, 15(2):161.
- [7] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance system for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1):90.
- [8] HIDEHISA Y, SHUNTARO S, MASAO N. Lane change steering manoeuvre using model predictive control theory [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 40(3): 669.
- [9] FAN Y, SUN X, WANG G, *et al.* On evolutionary genetic algorithm in path planning for a USV collision avoidance [J]. ICIC Express Letters, 2016, 10(7): 1691.
- [10] 余卓平, 李奕姗, 熊璐. 无人车运动规划算法综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(8):1150.  
YU Zhuoping, LI Yishan, XIONG Lu. A review of the motion planning problem of autonomous vehicle[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(8):1150.
- [11] 修彩靖, 陈慧. 基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(9):808.  
XIU Caijing, CHEN Hui. A research on local path planning for autonomous vehicles based on improved APF method [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(9): 808.
- [12] WANG P, GAO S, LI L, *et al.* Obstacle avoidance path planning design for autonomous driving vehicles based on an improved artificial potential field algorithm[J]. Energies, 2019, 12(12):2342.
- [13] LI G, TONG S, CONG F, *et al.* Improved artificial potential field-based simultaneous forward search method for robot path planning in complex environment. [C]// 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). Nagoya: IEEE, 2015: 760-765.
- [14] 王建强, 迟瑞娟, 张磊, 等. 适应驾驶员特性的汽车追尾报警-避撞算法研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(S1):7.  
WANG Jianqiang, CHI Ruijuan, ZHANG Lei, *et al.* Study on forward collision warning-avoidance algorithm based on driver characteristics adaptation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(S1):7.
- [15] 陈焕明, 郭孔辉. 基于航向角和位置偏差控制的驾驶员模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10):36.  
CHEN Huanming, GUO Konghui. Driver model based on heading angle and position deviation control [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(10):36.
- [16] DONGES E. A two-level model of driver steering behavior[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors & Ergonomics Society, 1978, 20(6):691.
- [17] 唐志荣, 冀杰, 吴明阳, 等. 基于改进人工势场法的车辆路径规划与跟踪[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 174.  
TANG Zhirong, JI Jie, WU Mingyang, *et al.* Vehicles path planning and tracking based on an improved artificial potential field method [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2018, 40(6): 174.
- [18] 戚志锦, 杨志刚, 黄燕. 基于模糊PID的智能4WS车辆换道路径跟踪控制[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(5):379.  
QI Zhijin, YANG Zhigang, HUANG Yan. Lane change track control for intelligent 4WS vehicle based on fuzzy adaptive PID [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2012, 2(5):379.
- [19] SHIM T, ADIREDDY G, YUAN H. Autonomous vehicle collision avoidance system using path planning and model-predictive-control-based active front steering and wheel torque control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(6):767.
- [20] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. New York: Springer, 2012.
- [21] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.  
YU Fan, LIN Yi. Automotive system dynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [22] CAO Y, REN W. Optimal linear-consensus algorithms: an LQR perspective [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics:Part B (Cybernetics), 2010, 40(3):819.
- [23] 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(1):26.  
GUO Konghui, PAN Feng, MA Fengjun. Preview optimized artificial neural network driver model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003(1):26.
- [24] JOHANSSON R, WILLIAMS D, BERGLUND A, *et al.* Carsim: a system to visualize written road accident reports as animated 3D scenes [C]// The Workshop on Text Meaning & Interpretation. Barcelona: Association for Computational Linguistics, 2004:57-64.