

·2024 中国汽车工程学会年会优秀论文专题·

# 基于域架构的纵横向结合行人紧急避障系统研究\*

南金瑞<sup>1,2</sup> 申哲宇<sup>1</sup> 邹渊<sup>1</sup> 刘宗烁<sup>1</sup>

(1.北京理工大学,机械与车辆学院,北京 100081;2.北京理工大学,深圳汽车研究院,深圳 518118)

**【摘要】**针对行人横穿场景,提出了一种基于域架构的纵横向结合的紧急避障策略。首先,搭建基于域架构的行人紧急避障系统,通过最大减速度模型和多项式组,拟合纵横向轨迹决策规划方法,并基于采样离散数值计算法,综合考虑避障安全距离、动力学约束和平顺性的成本函数,选取最优轨迹;然后,分别使用双环比例-积分-微分(PID)、线性二次型调节器(LQR)控制方法,实现对纵横向的运动控制;最后,通过PreScan、CarSim和Simulink联合仿真及域架构系统延时分析,验证了该避障系统的适用性,有效提升了道路安全性。

**关键词:**电子电气架构 行人避障 纵横向控制 轨迹规划 轨迹跟踪

**中图分类号:**U463.61;TP273 **文献标志码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20240717

## Research on Pedestrian Emergency Obstacle Avoidance System Based on Domain Architecture Combining Longitudinal and Transverse Directions

Nan Jinrui<sup>1,2</sup>, Shen Zheyu<sup>1</sup>, Zou Yuan<sup>1</sup>, Liu Zongshuo<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 2. Shenzhen Automotive Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen 518118)

**【Abstract】**An emergency obstacle avoidance strategy based on domain architecture combining longitudinal and transverse directions is proposed in the scenario of pedestrian crossing the street. Firstly, a pedestrian emergency obstacle avoidance system based on domain architecture is built, and the longitudinal and transverse trajectory decision planning method is fitted through the maximum deceleration model and polynomial group. Based on the sampling discrete numerical calculation method, the optimal trajectory solution is selected by the calculation and comparison of cost function that comprehensively considers the obstacle avoidance safety distance, dynamic constraint and smoothness. Then, the double-loop Proportion Integral Differential (PID) and Linear Quadratic Regulator (LQR) are used to control the longitudinal and transverse movements. Finally, the applicability of the obstacle avoidance system is verified through joint simulation of PreScan, CarSim and Simulink, as well as domain architecture system delay analysis. The obstacle avoidance system improves road safety effectively.

**Key words:** E/E Architectures, Pedestrian obstacle avoidance, Longitudinal and transverse control, Trajectory planning, Trajectory tracking

**【引用格式】**南金瑞,申哲宇,邹渊,等.基于域架构的纵横向结合行人紧急避障系统研究[J].汽车技术,2024(10):1-7.

NAN J R, SHEN Z Y, ZOU Y, et al. Research on Pedestrian Emergency Obstacle Avoidance System Based on Domain Architecture Combining Longitudinal and Transverse Directions[J]. Automobile Technology, 2024(10): 1-7.

## 1 前言

车辆避障技术通过实时感知周围环境,自动调控车辆制动与转向系统,可有效降低碰撞风险,避免发生安全事故。自动紧急制动系统(Autonomous Emergency Braking, AEB)作为核心技术之一<sup>[1]</sup>,虽已广泛应用,但仅凭AEB无法完全实现紧急避障功能,且该技术与横

向控制结合的避障策略尚未成熟<sup>[2]</sup>。因此,基于域控制器的集中式电子电气架构<sup>[3]</sup>(域架构)行人紧急避障系统的研发,对于自动驾驶车辆安全性能的提升具有重要意义。

目前,行人紧急避障通过人工势场、图片搜索以及智能算法等方式协同优化。吴斌等<sup>[4]</sup>结合不同车速下的车辆避障特征,提出了碰撞危险估计算法,以碰撞时

\*基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2500900)。

通信作者:邹渊(1976-),教授,主要研究方向为智能驾驶、智能底盘与动力,zouyuanbit@163.com。

间作为危险等级参数,判断避障工况下车辆转向紧急程度。Chen等<sup>[5]</sup>根据模型预测的行人路径调整前轮转向角,在紧急避障中效果良好,但忽略了行人与车辆交互对行人路径预测的影响。Lin等<sup>[6]</sup>基于势场的紧急避障路径规划拟合算法,通过二次函数计算对障碍物的排斥程度,完成紧急变道操作,但连续多次的紧急避障能力较弱。张家旭等<sup>[7]</sup>将汽车紧急换道的避障路径规划问题转化为B样条曲线控制点的非线性规划问题,有效处理前轮转向角和转向角速度约束的汽车紧急换道避障路径跟踪<sup>[8]</sup>。

现有的分布式电子电气架构无法实现纵横向避障算法,缺乏软、硬件一体化整合,针对上述问题,本文基于集中式域架构控制,建立数学模型,提出纵横向结合的行人紧急避障系统,并通过联合仿真试验验证该方案的有效性。

## 2 基于域架构的行人紧急避障系统

传统分布式电子电气架构中,由于各模块控制系统管理策略不同,协同设计难度较大,且电子控制器单元算力不足,集成度较低<sup>[9]</sup>。为满足行人紧急避障系统的技术要求,采用集中式域架构控制,如图1所示。

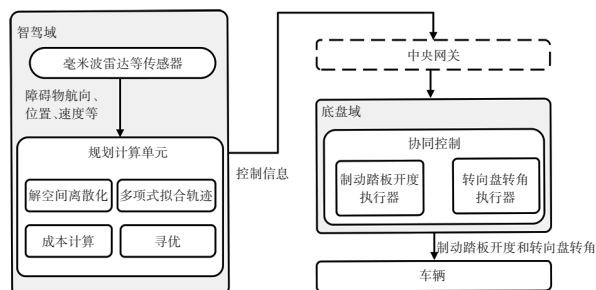


图1 基于域架构的行人紧急避障系统

功能域架构分为五大域:动力域、车身域、智驾域、智舱域和底盘域。其中,智舱域主要控制智能座舱中的各种电子信息系统功能,如驾驶员行为监测系统、导航系统等,因此,智驾域和智舱域需要进行图像处理、自然语言处理等,对硬件算力要求较高。各功能域间通过高速总线或车载以太网相连,其内部仍使用传统的串行通信网络。

本文基于功能域架构设计的行人紧急避障系统,通过集成智驾域中的毫米波雷达等传感器,获取行人位置、速度等信息,利用计算单元完成避障轨迹规划和控制信息处理,经中央网关输入至底盘域,实现制动踏板开度和转向盘转角的协同控制。同时,将自车的位置、航向及速度信息实时反馈至计算单元,从而保证完整的控制闭环。

## 3 避障轨迹规划

避障轨迹规划的目标是在成功避让行人的基础上,尽可能提高避障过程中车辆的稳定性和乘坐舒适性<sup>[10]</sup>。由于行车环境复杂多变,周车行驶状态、附近行人等运动轨迹的不确定性较大<sup>[11]</sup>。因此,车辆需根据周边环境采取相应的紧急避障措施,避免交通事故发生。

### 3.1 最大减速度模型

为了避让行人,防止非必要转向,本文采用最大减速度模型判断车辆是否应采用纵向与横向协同避障。通过车辆传感器获得当前车速 $v_{car}$ 、自车车头与前方行人的距离 $s_{rel}$ 。将行人视作质点,假设自车车速方向与行人速度 $v_{ped}$ 方向相互垂直,则二者发生碰撞的临界制动减速度为 $a_c = v_{car}^2 / 2s_{rel}$ 。

设车辆实际最大减速度为 $a_{limit}$ ,则当 $|a_{limit}| > |a_c|$ 时,采用AEB制动;反之,当 $|a_{limit}| < |a_c|$ ,且目标车道后方来车与自车距离较大时,采用纵向制动和横向转向协同避障。如图2所示,蓝色为车辆避障开始位置,采用AEB制动时,车辆横向坐标不变;采用纵向与横向协同避障时,车辆进行变道。

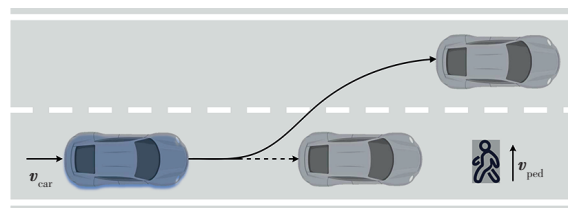


图2 避障方式决策

### 3.2 基于多项式的避障轨迹规划

行人横穿场景的假设如下:

- 以车辆开始避障时刻的自车位置为坐标原点,纵向为 $x$ 轴,横向为 $y$ 轴,建立平面直角坐标系,坐标系为右手系。
- 避障开始时刻为 $t_s$ ,结束时刻为 $t_e$ ,自车开始避障前,做匀速直线运动,速度方向平行于自车道,且与行人横穿方向垂直;避障结束时,自车停止,航向和初始航向一致。
- 避障过程中,行人速度的大小和方向均保持恒定。

#### 3.2.1 横向轨迹规划

在避障模型中,汽车的横向运动由纵向运动引起,将纵向位移设为 $x$ ,则横向位移为 $y=y(x)$ 。由纵向位移得到横向位移需满足避障轨迹条件,如表1所示。其中,在轨迹的起点和终点,曲率 $K$ 及其变化率均为0。

表1 避障轨迹条件

序号	类型	具体条件
1	动力学约束	路径曲率二阶连续且平滑
2	动力学约束	轨迹最大加速度小于阈值
3	曲率边界条件	当 $x=0, x=x_e$ 时, $K=0, dK/dx=0$
4	纵向轨迹边界条件	$x(0)=0, x(t_e)=x_e, x'(0)=v_s, x'(t_e)=0,$ $x''(0)=0, x''(t_e)=0$
5	横向轨迹边界条件	$y(0)=0, y(x_e)=y_e, y'(0)=0, y'(x_e)=0,$ $y''(0)=0, y''(x_e)=0$

根据文献[12],变道操作产生的S型曲线作为避障路径可由一元五次多项式拟合:

$$y = \sum_{i=0}^5 a_i x^i \quad (1)$$

式中: $x, y$ 分别为变道车辆的纵、横向坐标, $a_i$ 为多项式拟合曲线参数。

将表1中各项避障轨迹条件代入式(1),计算 $a_i$ ,得到多项式拟合的避障路径:

$$y = y_e \left[ 10 \left( \frac{x}{x_e} \right)^3 - 15 \left( \frac{x}{x_e} \right)^4 + 6 \left( \frac{x}{x_e} \right)^5 \right] \quad (2)$$

式中: $y_e, x_e$ 分别为避障结束时刻车辆的横、纵向坐标。

### 3.2.2 纵向轨迹规划

纵向轨迹描述车辆的纵向制动过程,假设整个避障过程中,自车做纵向匀减速运动,其纵向轨迹为:

$$x = \sum_{i=0}^2 b_i t^i \quad (3)$$

式中: $t$ 为运动时间, $b_i$ 为多项式参数。

同理,根据表1中条件4,得到车辆纵向轨迹方程:

$$x = v_s t - \frac{v_s^2}{4x_e} t^2 \quad (4)$$

式中: $v_s$ 为开始避障时的车速。

## 3.3 基于采样的避障轨迹最优规划

### 3.3.1 解空间离散化

开始避障时,将自车前方一定纵向距离和自车左侧一定横向距离组成的二维空间作为解空间,则紧急避障轨迹规划问题可视作在解空间内寻找 $(x_i, y_i)$ 的最优解,即找到规划轨迹对应成本函数的最小值。然而,由于解空间连续,遍历过程会增加算法的复杂度。因此,本文提出的行人紧急避障系统,依托高算力的域控制器,能够在有限的时间内计算出最优解,以满足行人紧急避障系统对实时性的要求。

由自车避障初始速度 $v_s$ 和最大制动减速度 $a_c$ ,计算自车停车所需最小纵向位移 $x_{min}$ ,对最大、最小纵向位移段进行线性插值,实现纵向位移的离散化,则最大纵向位移为 $x_{max} = k_x \cdot x_{min}$  ( $k_x$ 为常数)。根据城市道路工程设计

规范规定<sup>[13]</sup>,车道宽度为3.5~3.75 m,则对避障的横向位移段0~5.25 m线性插值,获得横向位移的离散化。

### 3.3.2 定义成本函数

由于二维解空间内包含若干离散点,各离散点均对应一条规划轨迹(纵向轨迹和横向轨迹),为了确定最优轨迹,引入成本函数,即解空间某个离散点 $(x_i, y_i, t_i)$ 对应轨迹 $T_i$ 的成本函数值越低,表示轨迹越准确。

成本函数表示实际避障轨迹与预测避障轨迹的拟合程度,直接决定避障的成功率。通常,成本函数受到车辆加速度与加速度随时间变化率影响,轨迹 $T_i$ 的成本函数为:

$$C_i(i) = k_a \frac{a_{max}}{a_c} + k_j \frac{j_{max}}{j_c} + k_y \frac{\Delta y_{safe}}{\Delta y} \quad (5)$$

式中: $a_{max}, j_{max}$ 分别为轨迹 $T_i$ 的最大加速度和加速度变化率, $a_c, j_c$ 分别为车辆动力学限制决定的最大减速度和最大加速度, $\Delta y$ 为轨迹 $T_i$ 与行人纵向坐标重合时的横向坐标差值, $\Delta y_{safe}$ 为最小横向安全距离, $k_a, k_j, k_y$ 均为常数。

由式(5)可知,若 $a_{max}, j_{max}$ 越大, $\Delta y$ 越小,则成本函数值越大,即该轨迹越差。当 $\Delta y$ 的值足够大时,对轨迹的成本函数的影响可忽略不计,避免了横向安全距离过大而导致自车转向过度,影响行驶稳定性。

遍历解空间所有离散点时,需按照停车时刻的纵向坐标 $x_e$ 、横向坐标 $y_e$ 的顺序进行采样,计算各离散点的成本函数,将避障轨迹规划最优解作为底盘域输入,实现避障功能。

## 4 纵横向控制器设计

行人紧急避障取决于规划轨迹的合理性和控制系统的轨迹跟踪性能,因此,本文分别采用双环PID和线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)对车辆的纵、横向运动进行控制。

### 4.1 基于双环PID控制的纵向控制器

单环PID控制以当前车速与目标车速差值为输入,输出控制量,通过调节油门踏板和制动踏板开度,实现车速控制。而在行人紧急避障系统中,轨迹规划会影响该时刻车辆的位置和车速。因此,本文采用双环PID控制,如图3所示,通过车辆的纵向位置、纵向速度计算控制量。

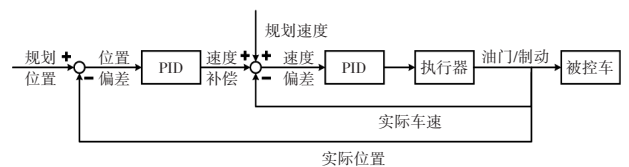


图3 基于双环PID控制的纵向控制器

### 4.2 基于LQR的横向控制器

基于车辆动力学模型的路径跟踪偏差系统状态方

程为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta + \mathbf{C}r_{des} \\ \mathbf{x} = (e_{cop}, \dot{e}_{cop}, e_{\theta}, \dot{e}_{\theta}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为控制系统的状态量, $e_{cop}$ 为车辆横向控制的横向位移误差, $e_{\theta}$ 为车辆航向角误差, $\delta$ 为前轮转角, $r_{des}$ 为参考轨迹线的期望横摆角速度, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 为方程各项系数。

横向控制器能够令跟踪偏差快速平稳地趋于0,同时减少前轮转角的控制输入。因此,优化目标函数 $J$ 可表示为:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \delta^T \mathbf{R} \delta) dt \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为控制系统的状态量; $\delta$ 为转角的的状态量; $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 分别为状态权重矩阵和控制量权重矩阵,通常根据经验确定初值,经过多次迭代不断调整。

根据LQR最优控制理论<sup>[15]</sup>,对式(7)的目标函数优化求解,最优控制规律 $\delta^*$ 为:

$$\begin{cases} \delta^* = -(\mathbf{R} + \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d \cdot \mathbf{x} \\ -\mathbf{P} = \mathbf{A}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d^{-1} - \mathbf{P} \mathbf{B}_d^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d^{-1} + \mathbf{Q} \mathbf{A}_d^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}_d$ 、 $\mathbf{B}_d$ 为离散化矩阵,矩阵 $\mathbf{P}$ 通过黎卡提(Riccati)方

程求解<sup>[16]</sup>。

根据式(8)设计状态反馈调节器,通过状态反馈实现闭环最优控制,状态反馈调节增益 $\mathbf{K}=(\mathbf{R}+\mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{B}_d)^{-1} \mathbf{B}_d^T \mathbf{P} \mathbf{A}_d$ ,因此,最优状态反馈前轮转角 $\delta_{fb}=\delta^*=-\mathbf{K}\mathbf{x}$ 。

由于LQR状态反馈控制的求解过程中未考虑路径的动态变化,为了消除稳态误差,需在前馈控制中增加路径的曲率和车辆转向不足特性,作为反馈控制输入量 $\delta_{ff}$ :

$$\delta_{ff} = \frac{L}{R} + j_v a_y + k e_{ss} \quad (9)$$

式中: $L$ 为自车轴距, $R$ 为参考路径中位置的转向半径, $j_v$ 为不足转向梯度, $k$ 为 $\mathbf{K}$ 矩阵中的角度偏差反馈控制增益, $e_{ss}$ 为稳态时角度跟踪偏差。

因此,总前轮转角输入为 $\delta=\delta_{ff}+\delta_{fb}$ 。

## 5 验证与分析

### 5.1 联合验证框架

为验证避障策略的有效性,开展PreScan、CarSim和Simulink联合仿真,验证模型由环境感知和定位模块、规划和控制模块以及动力学模型模块构成,如图4所示。

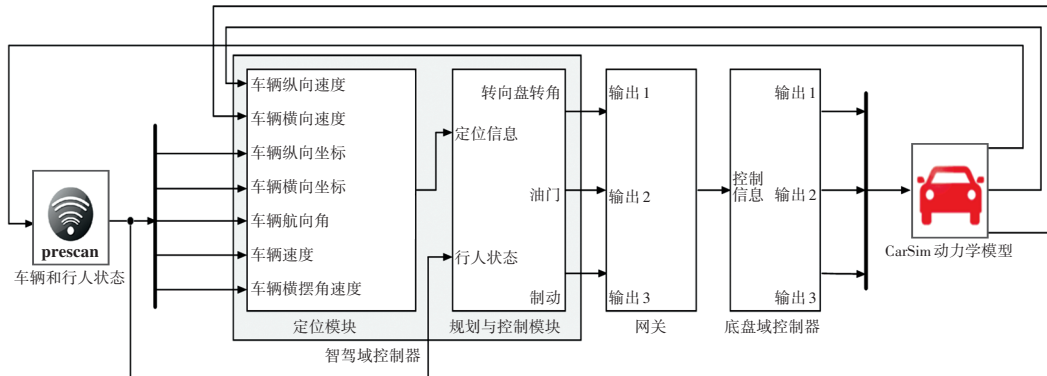


图4 联合仿真验证框架

环境感知和定位模块通过PreScan的内置传感器,收集环境信息和自车定位信息;规划与控制模块将自车定位信息、行人与障碍物的运动信息作为输入,执行避障与控制算法,计算得到控制输出,包括油门、制动踏板开度以及转向盘转角;动力学模型模块根据CarSim定义模型,由控制输出计算当前自车目标位置、车速等信息,并同步给PreScan,实现验证闭环。

本文选用奥迪A8车型,车辆的动力学模型参数与实车一致,具体参数如表2所示。

表2 车辆动力学模型参数

参数	取值	参数	取值
整车质量 $m/\text{kg}$	1 920	簧上质量 $m_s/\text{kg}$	1 820
质心距前轴距离 $a/\text{m}$	1.265	质心距后轴距离 $b/\text{m}$	1.682
车辆质心高度 $h/\text{m}$	0.590	转动惯量 $I_z/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	4 095

### 5.2 试验场景搭建

本文针对行人横穿场景,验证行人避障算法,在PreScan中建立验证场景,如图5所示,自车前方存在障碍,左侧车道的横向空间约5m。

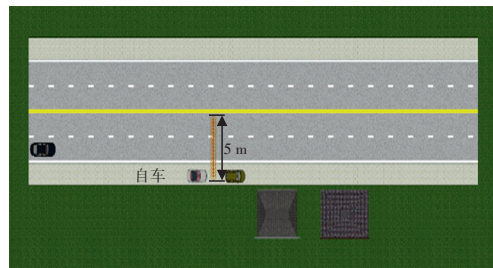


图5 验证试验场景

针对行人速度和车辆速度垂直的系统进行测试,依照测试规范<sup>[17]</sup>,测试场景包括CPFA-25、CPFA-50、CPNA-25、CPNA-75,如图6所示。

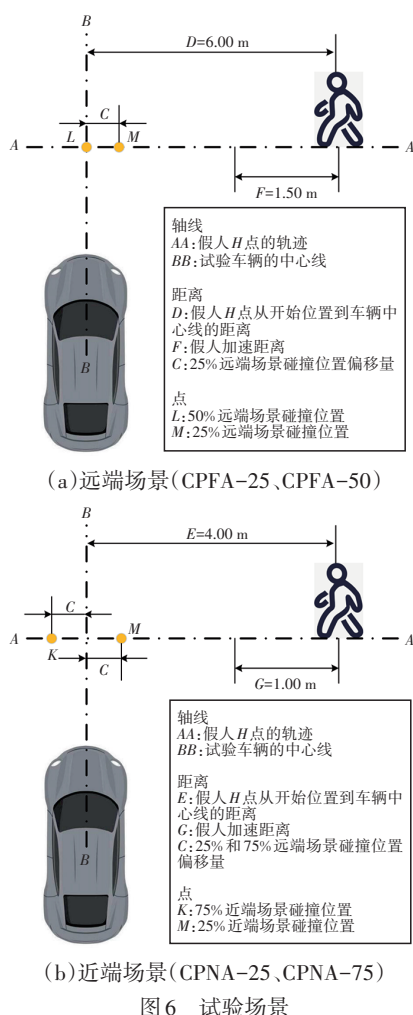


图6 试验场景

远端场景下,行人以6.5 km/h垂直于车辆行驶方向移动,自行车以相应的试验速度行驶,碰撞位置分别为图6a中M、L点;近端场景下,行人以5 km/h垂直于车辆行驶方向移动,自行车以相应的试验速度行驶,碰撞位置分别为图6b中M、K点。

本文行车辆场景主要为城市道路,限速80 km/h。按照文献[17]中行人自动紧急制动系统测试规范,根据自行车初始速度、避障系统开始时自行车车头与行人的距离以及预计碰撞位置,对试验场景分类。考虑到行人横穿场景情况紧急,选取自行车与行人的距离分别为15 m、20 m和30 m。因此,试验验证分为3组,每组包含6个不同场景,共18个场景,如表3所示。依照GB/T 39901—2021《乘用车自动紧急制动系统(AEBS)性能要求及试验方法》<sup>[18]</sup>,静止目标条件下预警和启动试验中被试车辆限速为30 km/h,因此,选取试验车辆初始速度分别为36 km/h、48 km/h和72 km/h。

### 5.3 联合验证算法

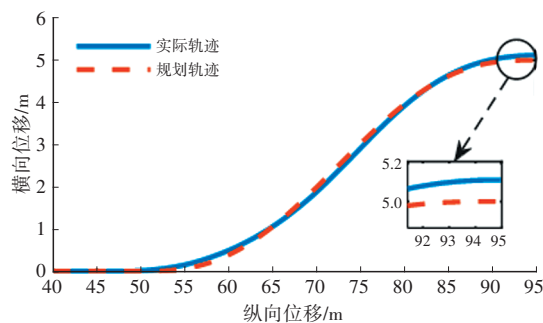
#### 5.3.1 自行车高速行驶远距离避让行人

自行车以72 km/h的初速度高速行驶,距离行人30 m

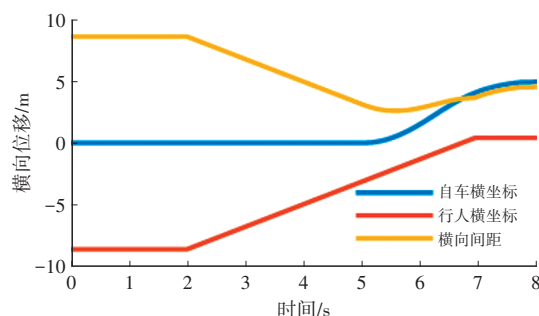
时,系统发现行人突入车道,且预期碰撞位置为25%,验证结果如图7所示。

表3 试验场景设置

自行车与行人距离 $\Delta s/m$	预计碰撞位置	行人速度 / $km \cdot h^{-1}$	自行车初始速度 / $km \cdot h^{-1}$
15	25%、75%	5	36、48、72
20	25%、50%	6.5	36、48、72
30	25%、50%	6.5	36、48、72



(a) 路径跟踪



(b) 自行车与行人横向坐标差

图7 高速避障曲线

图7a为自行车横向位移随纵向位移的变化情况,纵向位移小于50 m时,自行车沿着当前车道直线行驶,横向位移始终为0。之后,自行车开始跟踪避障系统输出的规划轨迹,最大横向位移误差为0.11 m,因此,控制模块能够较好地跟踪目标路径。

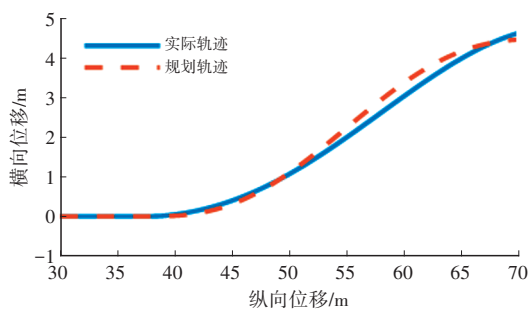
在考虑车身宽度条件下,自行车与行人横向坐标差随时间的变化情况见图7b,二者横向坐标差最小值为2.6 m,因此,在避障过程中,自行车与行人始终保持一定的横向安全距离。

#### 5.3.2 自行车中低速行驶近距离避让行人

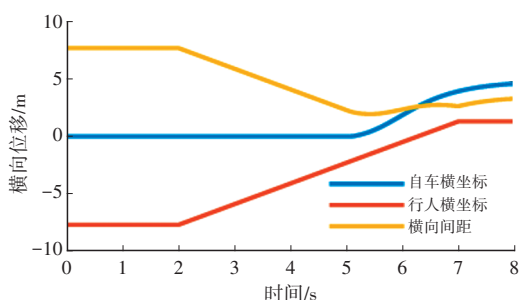
自行车以48 km/h的初始速度中低速行驶,距离行人15 m时,系统发现行人突入车道,且预期碰撞位置为25%,验证结果如图8所示。

图8a为自行车横向位移随纵向位移的变化情况,在纵向位移小于37.5 m时,自行车沿着当前车道直线行驶,横向位移始终为0。之后,自行车开始跟踪避障系统输出的规划轨迹,但因避障系统发现行人时,自行车和行人距

离较近,因此,避障过程中侧向加速度较大,导致控制模块跟踪规划路径的能力下降。



(a) 路径跟踪



(b) 自行车和行人横向坐标差

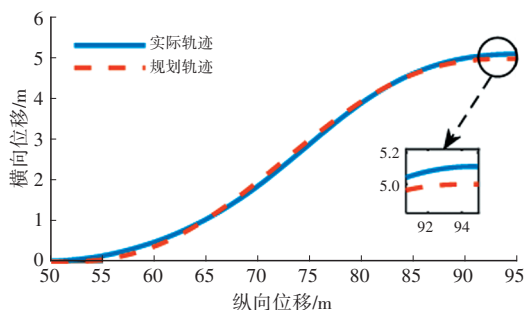
图8 低速避障曲线

在考虑车身宽度条件下,自行车与行人横向坐标差随时间的变化情况见图8b。尽管紧急情况下控制模块的跟踪效果降低,但二者横向坐标差最小值为1.95 m,表明在避障过程中仍能保持横向安全。

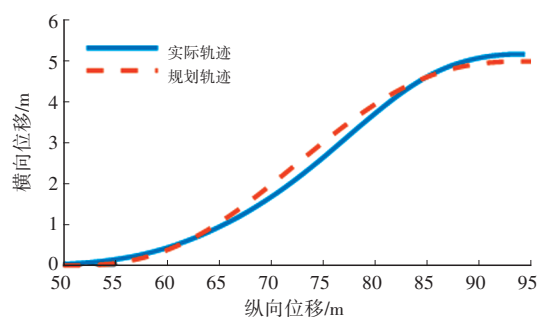
### 5.3.3 系统延时响应分析

为了确保仿真更接近实车验证,需考虑传感器、传输、机械等延时对避障系统的影响,因此,在控制模块中引入 Transport Delay 模块,通过固定延时模拟真实延时。

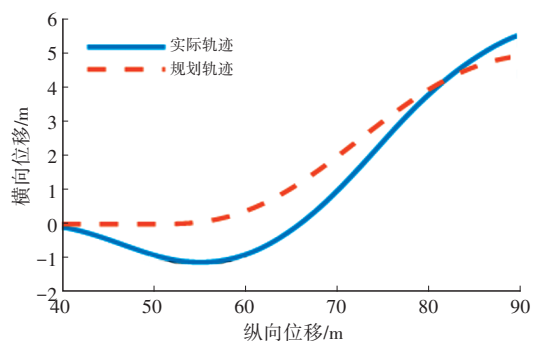
控制模块分别设置 250 ms、500 ms、1 000 ms 延时,避障路径的跟踪曲线如图9所示。在 250 ms 延时下,路径跟踪效果与零延时的理想情况相近,最大横向位置误差约为 0.11 m;当延时为 1 000 ms 时,实际轨迹与规划轨迹方向相反,随着延时的增加,系统的路径跟踪准确性降低。因此,在域架构设计中,为保证良好的避障效果,系统延时控制应在 300 ms 以内。



(a) 250 ms 延时



(b) 500 ms 延时



(c) 1 000 ms 延时

图9 系统延时路径跟踪

## 6 结束语

针对行人横穿场景,本文提出一种基于域架构、结合纵横向控制的行人紧急避障系统。结果表明,在高速远距离与低速近距离的工况中,均获得较好的避障效果。因此在保证车辆侧向稳定性和动力学约束的前提下,基于域架构的、综合纵向制动和横向转向的行人紧急避障系统能够在一定车速和反应距离下避让行人,提升交通安全。

本文建立的域架构系统,道路场景依照我国法规建立,与我国实际路况相符,符合软件设计集中算力、各模块协同工作的发展趋势。未来,可用于新型域架构汽车避障系统的设计。

### 参考文献

[1] YI J, ALVAREZ L, HOROWITZ R. Adaptive Emergency Braking Control with Underestimation of Friction Coefficient[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 381-392.

[2] SEEWALD A, CARSTEN H, KELLER M, et al. Emergency Steering Assist for Collision Avoidance[J]. ATZ Worldwide, 2015, 117(1): 14-19.

[3] 王远. 智能汽车横向辅助避障控制策略及硬件在环研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

WANG Y. Researches on the Control of Lateral Assistance for Intelligent Vehicle and Hardware-in-the-Loop[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

- [4] 吴斌,朱西产,沈剑平,等.基于自然驾驶数据的危险评估算法研究[J].汽车工程,2017,39(8):907-914.  
WU B, ZHU X C, SHEN J P, et al. A Study on Risk Assessment Algorithm Based on Natural Driving Data[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(8): 907-914.
- [5] CHEN H, ZHANG X. Path Planning for Intelligent Vehicle Collision Avoidance of Dynamic Pedestrian Using Att-LSTM, MSFM, and MPC at Unsignalized Crosswalk[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4): 4285-4295.
- [6] LIN P, YANG J H, QUAN Y S, et al. Potential Field-Based Path Planning for Emergency Collision Avoidance with A Clothoid Curve in Waypoint Tracking[J]. Asian Journal of Control, 2022, 24(3): 1074-1087.
- [7] 张家旭,杨雄,施正堂,等.汽车紧急换道避障路径规划与跟踪控制[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(9):86-93+106.  
ZHANG J X, YANG X, SHI Z T, et al. Path Planning and Tracking Control for Emergency Lane Change and Obstacle Avoidance of Vehicles[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(9): 86-93+106.
- [8] NAVALE V M, WILLIAMS K, LAGOSPIRIS A, et al. (R) evolution of E/E Architectures[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2015, 8(2): 282-288.
- [9] 刘佳熙,丁锋.面向未来汽车电子电气架构的域控制器平台[J].中国集成电路,2019,28(9):82-87.  
LIU J X, DING F. Domain Controller Platform for Next Generation Automotive E/E Architecture[J]. China Integrated Circuit, 2019, 28(9): 82-87.
- [10] 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):554-561.  
WU B, ZHU X C, SHEN J P, 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): 554-561.
- [11] FU M, ZHANG K, YANG Y, et al. Collision-Free and Kinematically Feasible Path Planning along A Reference Path for Autonomous Vehicle[C]// Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Seoul, Korea (South): IEEE, 2015.
- [12] NELSON W. Continuous-Curvature Paths for Autonomous Vehicles[C]// 1989 International Conference on Robotics and Automation. Scottsdale, AZ, USA: IEEE, 1989.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市道路工程设计规范:CJJ 37—2012(2016年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.  
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Design Specification for Urban Road Engineering: CJJ 37—2012 (2016 Edition)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [14] 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): 455-473.
- [15] 陈亮,秦兆博,孔伟伟,等.基于最优前轮侧偏力的智能汽车LQR横向控制[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(9):906-912.  
CHEN L, QIN Z B, KONG W W, et al. Lateral Control Using LQR for Intelligent Vehicles Based on the Optimal Front-Tire Lateral Force[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(9): 906-912.
- [16] XU S B, PENG H. Design, Analysis, and Experiments of Preview Path Tracking Control for Autonomous Vehicles[J]. 2019, 21(1): 48-58.
- [17] 中国汽车技术研究中心.C-NCAP管理规则[S].天津:中国汽车技术研究中心,2021.  
China Automotive Technology and Research Center. C-NCAP Management Rules[S]. Tianjin: China Automotive Technology and Research Center, 2021.
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部.乘用车自动紧急制动系统(AEBS)性能要求及试验方法:GB/T 39901—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Performance Requirements and Test Methods for Automatic Emergency Braking Systems (AEBS) for Passenger Cars: GB/T 39901—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

(责任编辑 瑞 秋)

修改稿收到日期为2024年8月16日。