

中文引用格式:洪亮,陈志豪,李梁. 混杂工况下面向VRU安全的主动转向控制策略[J]. 中国安全科学学报,2024,34(12):84-93.
英文引用格式:HONG Liang, CHEN Zhihao, LI Liang. Active steering control strategy for VRU safety under mixed conditions [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(12): 84-93.

混杂工况下面向VRU安全的主动转向控制策略*

洪亮 副教授, 陈志豪, 李梁

(江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江 212013)

中图分类号: X951 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.12.0252

基金项目: 国家自然科学基金资助(51805224); 中国博士后科学基金资助(2020M671307); 江苏省资助博士后研究人员计划项目(2019Z061); 江苏省博士后科研资助计划项目(2019K043)。

【摘要】 为探明弱势道路使用者(VRU)由弯道外侧或内侧出发,以匀加速、匀减速、匀速运动状态横穿马路时,主动转向控制策略的保护功效。首先,建立汽车与VRU的空间位置关系模型、安全评估模型及主动转向安全距离模型,提出一种主动转向控制策略;然后,利用五次多项式换道法、Frenet坐标转换方法与模型预测控制方法,设计横向避撞控制器;最后,以电动自行车骑车人作为避撞对象,基于目标车道状态、电动自行车的运动方向和速度,构建18种混杂工况,验证主动转向控制策略的避撞效果。结果表明:混杂工况下,主动转向控制策略均能避免本车与电动自行车发生碰撞,同时,能够确保本车换道过程中,目标车道中的前车与后车以及本车正常行驶,且本车的乘坐舒适性较好。

【关键词】 弱势道路使用者(VRU); 弯道; 运动状态; 主动转向; 混杂工况

Active steering control strategy for VRU safety under mixed conditions

HONG Liang, CHEN Zhihao, LI Liang

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: This study investigated the protective effect of an active steering control strategy when VRU start from the outside or inside of a curve and cross the road with uniform acceleration, deceleration, and uniform velocity. Firstly, the spatial positional relationship models for vehicles and VRU, the safety assessment models, and the active steering safety distance models were established to propose an active steering control strategy. Then, a lateral collision avoidance controller was designed using the quintic polynomial lane-change method, the Frenet coordinate transformation method, and the model predictive control method. Finally, with electric bicycle riders as the collision avoidance targets, 18 mixed conditions were constructed based on the state of the target lane status, the movement direction, and the speed of the electric bicycle to verify the collision avoidance effect of the active steering control strategy. The results indicated the active steering control strategy avoided collisions between vehicles and electric bicycles under mixed conditions. The preceding, ego, and following vehicles in the target lane can drive normally during lane-changing, and the vehicle ride comfort was satisfactory.

Keywords: vulnerable road users (VRU); curved road; motion states; active steering operation; mixed conditions

0 引言

在道路交通事故中,行人、两轮车骑车人称为弱势道路使用者(Vulnerable Road Users, VRU)^[1]。相比于其他道路使用者,受伤的 VRU 需要更长的恢复周期,这给所在家庭带来沉重的心理负担与巨大的经济损失^[2]。世界卫生组织的统计数据表明:全球每年约有 130 万人死于道路交通事故,其中一半以上的死亡者为 VRU^[3]。在我国,VRU 的伤亡人数逐年递增。因此,VRU 的道路安全性亟待加强。

主动避撞系统能够有效规避汽车与 VRU 的碰撞风险。主动避撞系统主要包括主动制动系统与主动转向系统。主动制动系统能够自动降低车辆的行驶速度,使汽车与 VRU 保持安全距离,以规避碰撞^[4]。然而,当汽车与 VRU 的纵向距离小于主动制动所需的最小安全距离时,主动制动系统的避撞效果不佳。因主动转向所需的最小安全距离小于主动制动所需的最小安全距离,此时主动转向系统能够改变车辆行驶路径,避免汽车与 VRU 发生碰撞^[5]。

关于主动转向控制策略的研究主要涉及路径规划与路径跟踪 2 方面。在路径规划方面,LI Junxiang 等^[6]针对直道工况,提出基于深度强化学习的路径规划方案。FENG Jian 等^[7]针对行人运动的随机性,研究兼顾安全性、鲁棒性与乘坐舒适性的路径规划方法。YI Shuai^[8]利用 B 样曲线、多项式曲线等曲线拟合方法,开展路径规划工作。WANG Haoan 等^[9]基于弹性带方法,实时修正换道路径,避免密集环境中汽车与 VRU 发生碰撞。在路径跟踪方面,WANG Pengwei 等^[10]提出基于时变动态变量和车辆模型融合的转向操纵方法,以提升路径跟踪精度。CHOI 等^[11]通过约束前轮转向角与纵向加速度,确保主动转向中的跟踪精度。WANG Hengyang 等^[12]提出一种基于模糊自适应权重控制的改进型模型预测控制算法,以提高车辆跟踪期望路径时的乘坐舒适性。CHEN Shuping 等^[13]提出基于模型预测和 PID 控制的路径跟踪算法。王玉琼等^[14]开发前馈-反馈及自抗扰控制补偿相结合的路径跟踪算法。

当前主动转向控制策略主要为直道工况下,以匀速运动状态横穿马路的 VRU 提供保护。然而,一方面,道路环境复杂,弯道工况比较普遍^[15-16],且适用于直道工况的主动转向控制策略在弯道工况中的避撞效果不佳^[17-18];另一方面,VRU 的运动状态存在随机性与多样性^[19-20]。因此,有必要研究 VRU 由弯道外侧向内侧、由弯道内侧向外侧,以匀加速、

匀减速、匀速运动状态横穿马路时,主动转向控制策略的保护功效。笔者提出一种主动转向控制策略,以电动自行车骑车人为避撞对象,基于目标车道状态、电动自行车运动方向和运动速度,构建混杂工况,以验证主动转向控制策略的避撞效果,拟拓展其保护范围。

1 主动转向控制策略

建立弯道工况下的汽车与 VRU 的空间位置关系模型、安全评估模型以及主动转向安全距离模型,从而提出一种主动转向控制策略。

1.1 汽车与 VRU 的空间位置关系模型

由于弯道存在曲率,直道与弯道工况下,VRU 相对汽车的空间位置关系存在较大差异。弯道工况下,汽车与 VRU 的运动轨迹如图 1 所示。 C 为 VRU 的质心; v_c 与 v 分别为汽车与 VRU 的运动速度, m/s ; \widehat{AB} 为汽车的行驶路径; $A'B'$ 为 VRU 的运动路径; M 为两者路径的交点(碰撞点);毫米波雷达安装于汽车保险杠的横向中心处, oxy 为毫米波雷达安装坐标系; ρ 为汽车与 VRU 间的距离, m ; θ 为汽车与 VRU 间的夹角, $(^\circ)$; α 为汽车行驶路径的曲率半径与 VRU 运动路径的夹角, $(^\circ)$; O 为弯道的曲率中心; R 分别为曲率半径, m 。

汽车行驶路径的曲率半径 R 为:

$$R = \frac{v_c}{\omega_c} \quad (1)$$

式中 ω_c 为汽车的横摆角速度, rad/s 。

VRU 相对于汽车的横向距离 Y 为:

$$Y = \begin{cases} \sqrt{R^2 + 2\rho R \sin\theta + \rho^2} - R & \text{由外侧向内侧运动} \\ R - \sqrt{R^2 - 2\rho R \sin\theta + \rho^2} & \text{由内侧向外侧运动} \end{cases} \quad (2)$$

汽车行驶至碰撞点的纵向路径长度 X 为:

$$X = \begin{cases} R \arctan \frac{\rho \cos\theta}{R + \rho \sin\theta} & \text{由外侧向内侧运动} \\ R \arctan \frac{\rho \cos\theta}{R - \rho \sin\theta} & \text{由内侧向外侧运动} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 安全评估模型

确定汽车与 VRU 的相对位置关系后,开展 VRU 的安全评估,建立安全评估模型,以实时调整汽车行驶状态,避免碰撞。

弯道工况下,当 VRU 横穿马路时,汽车安全行

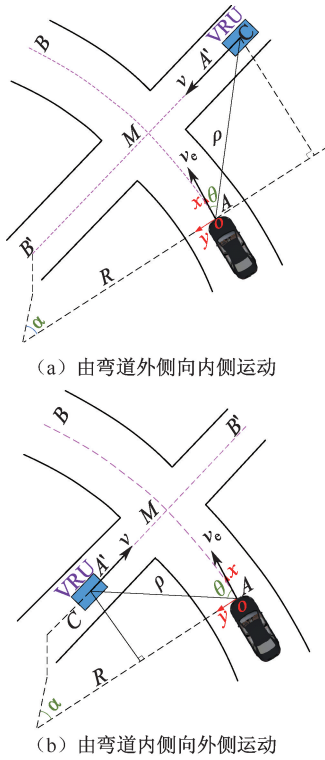


图1 汽车与VRU的运动轨迹

Fig. 1 Motion diagram of car and VRU

驶区域 S 是指以汽车与VRU的安全间距 D 为宽,汽车即将行驶过程中毫米波雷达安装点的运动轨迹为弧长,组成的弧形范围。

汽车与VRU的安全间距 D 的表达式为:

$$D = D_e/2 + D_v/2 + d_m \quad (4)$$

式中: D_e 为汽车的横向宽度, m; 对于行人, D_v 为0, 对于两轮车骑车人, D_v 为两轮车的纵向长度, m; d_m 为汽车与VRU应保持的最小间距, m。

VRU进入 D 的历经时间为进入时间 t_E , s; VRU离开 D 的历经时间为离开时间 t_D , s; 汽车、VRU到达同一位置的历经时间为碰撞时间 t_C , s。

VRU以加速、减速、匀速运动状态,由弯道外侧向内侧横穿马路时, t_E 的计算方法如下:

$$t_E = \begin{cases} \frac{\sqrt{v^2 - 2a_v(Y+D)} - v}{a_v} & \left[\frac{v^2}{2(Y+D)} < a_v < 0 \wedge v > 0 \right] \\ \frac{Y+D}{v} & a_v = 0 \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中 a_v 为VRU的运动加速度, m/s^2 。

VRU以加速、减速、匀速运动状态,由弯道内侧向外侧横穿马路时, t_E 的计算方法如下:

$$t_E = \begin{cases} \frac{-\sqrt{v^2 - 2a_v(Y-D)} - v}{a_v} & \left[0 < a_v < \frac{v^2}{2(Y-D)} \wedge v < 0 \right] \\ \frac{Y-D}{v} & a_v = 0 \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

若VRU已位于汽车安全行驶区域内, t_E 为0。

VRU以加速、减速、匀速运动状态,由弯道外侧向内侧横穿马路时, t_D 的计算方法如下:

$$t_D = \begin{cases} \frac{\sqrt{v^2 - 2a_v(Y-D)} - v}{a_v} & \left[\frac{v^2}{2(Y-D)} < a_v < 0 \wedge v > 0 \right] \\ \frac{Y-D}{v} & a_v = 0 \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

VRU以加速、减速、匀速运动状态,由弯道内侧向外侧横穿马路时, t_D 的计算方法如下:

$$t_D = \begin{cases} \frac{-\sqrt{v^2 - 2a_v(Y+D)} - v}{a_v} & \left[0 < a_v < \frac{v^2}{2(Y+D)} \wedge v < 0 \right] \\ \frac{D+Y}{v} & a_v = 0 \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

若VRU已位于汽车安全行驶区域内, t_D 、 t_C 的计算方法如下:

$$t_D = \begin{cases} \frac{-\sqrt{v^2 - 2a_v(Y+D)} - v}{a_v} & \left[0 < a_v < \frac{v^2}{2(Y+D)} \wedge v < 0 \right] \\ \frac{D+Y}{v} & a_v = 0 \wedge v < 0 \\ \frac{\sqrt{v^2 - 2a_v(Y-D)} - v}{a_v} & \left[\frac{v^2}{2(Y-D)} < a_v < 0 \wedge v > 0 \right] \\ \frac{Y-D}{v} & a_v = 0 \wedge v > 0 \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$t_C = \frac{X}{v_c} \quad (10)$$

比较 t_E 、 t_D 和 t_C 的大小,建立安全评估模型。利用评估信号 K_0 判断汽车与VRU的碰撞风险。若 K_0 为1,则汽车将与VRU发生碰撞,VRU处于危险状态;若 K_0 为0,汽车与VRU无碰撞风险,VRU处于安全状态。 K_0 的计算方法如下:

$$K_0 = \begin{cases} 1, & t_E < t_C < t_D \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

1.3 主动转向安全距离模型

当本车 C_e 的行驶速度大于目标车道中前车 C_f

的行驶速度,本车 C_e 的行驶速度小于目标车道中后车 C_r 的行驶速度时, C_e 换道过程中, C_e 与 C_f 、 C_r 发生碰撞的概率较大。求解 C_e 与 C_f 、 C_r 应保持的最小纵向距离,以避免 C_e 换道过程中, C_e 与 C_f 、 C_r 发生碰撞。 C_e 、 C_f 与 C_r 的行驶路径如图 2、图 3 所示。换道初始时刻下, C_e 与 C_f 保持的弧长为 l_f, m ; C_e 与 C_r 保持的弧长为 l_r, m ;虚线为 C_e 的换道路径; v_e 、 v_f 与 v_r 分别为 C_e 、 C_f 与 C_r 的行驶速度, m/s ; a_e 、 a_f 与 a_r 分别为 C_e 、 C_f 与 C_r 的加速度, m/s^2 。

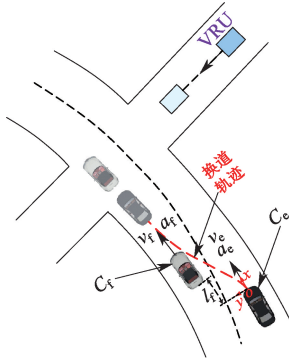


图 2 本车 C_e 与前车 C_f 的行驶路径

Fig. 2 Motion trajectory of C_e and C_f

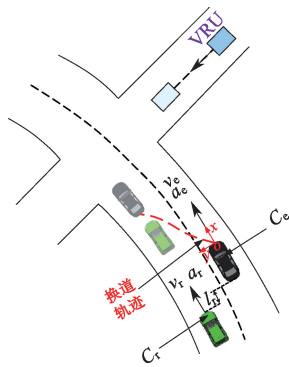


图 3 本车 C_e 与后车 C_r 的行驶路径

Fig. 3 Motion trajectory of C_e and C_r

为避免换道过程中, C_e 与 C_f 、 C_r 发生碰撞,换道初始时刻, C_e 与 C_f 应保持的最小弧长 l_m^f 为:

$$l_m^f = \iint_0^{t_s \tau} (a_e - a_f) d\tau dt + (v_e - v_f)t_s + D_m^f \quad (12)$$

C_e 与 C_r 应保持的最小弧长 l_m^r 为:

$$l_m^r = \iint_0^{t_s \tau} (a_r - a_e) d\tau dt + (v_r - v_e)t_s + D_m^r \quad (13)$$

式中: t_s 为换道时间, s ; D_m^f 、 D_m^r 为 C_e 完成换道后, C_e 与 C_f 、 C_e 与 C_r 应保持的最小间距, m 。

基于换道初始时刻下, C_e 与 C_f 应保持的最小弧长 l_m^f ; C_{ego} 与 C_r 应保持的最小弧长 l_m^r , 建立主动转向安全距离模型。利用转向信号 K_s 判断汽车开展主动转向的可行性与安全性。若 K_s 为 1, 则本车主动转向无碰撞风险; 若 K_s 为 0, 则本车换道过程中, 将与目标车道中的前车、后车发生碰撞。 K_s 的计算方法如下:

$$K_s = \begin{cases} 1 & K_B = 0 \wedge l_f > l_m^f \wedge l_r > l_m^r \\ 0 & K_B = 1 \vee l_f < l_m^f \vee l_r < l_m^r \end{cases} \quad (14)$$

式中: K_B 为制动信号, 若 $K_B = 1$, 本车开展主动制动操作; 若 $K_B = 0$, 本车停止主动制动操作。

考虑汽车的安全性与乘坐舒适性, 设计弯道工况下的主动转向控制策略, 具体步骤如下:

首先, 确定本车与 VRU 的相对位置关系, 预测获得 VRU 的运动状态后, 计算 VRU 以不同运动状态横穿马路时的 t_E 、 t_D 、 t_C , 通过安全评估模型判断汽车与 VRU 的碰撞风险。若 $t_E < t_C < t_D$, 则 VRU 处于危险状态 ($K_0 = 1$); 否则 VRU 处于安全状态 ($K_0 = 0$)。其次, 判断本车行驶至碰撞点的纵向路径长度 X 与本车最小主动制动安全距离 S_b 之间的关系。若 $X > S_b$, 则本车制动距离充足 ($K_C = 1$), 开展主动制动操作 ($K_B = 1$), 以避免本车与 VRU 发生碰撞, 当 VRU 相对于本车的横向距离 Y 大于本车宽度 D_e 时, 本车停止制动 ($K_B = 0$), 成功避撞; 若 $X < S_b$, 则主动制动无法避免本车与 VRU 发生碰撞。最后, 通过主动转向安全距离模型, 判断换道初始时刻下, 本车与目标车道中的前车、后车保持的弧长 l_f 、 l_r , 本车与前车、后车应保持的最小弧长 l_m^f 、 l_m^r 之间的关系, 若 $l_f > l_m^f$ 且 $l_r > l_m^r$, 则主动转向无碰撞风险, 本车开展主动转向操作 ($K_s = 1$), 以避免本车与 VRU 发生碰撞; 否则主动转向过程中, 本车将与前车、后车发生碰撞, 本车停止转向 ($K_s = 0$), 此时本车采取制动操作, 最大限度降低车速, 以减轻 VRU 受到的伤害。

2 横向避撞控制器

基于主动转向控制策略, 设计横向避撞控制器。横向避撞控制器采用分层设计, 上层控制器利用五次多项式换道法, 规划横向避撞路径; 下层控制器基于模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 方法, 输出合理的前轮转角, 使得汽车及时跟踪横向避撞路径。

2.1 基于五次多项式换道法的上层控制器

五次多项式换道法根据换道起点与换道终点的

信息、车辆实时运动状态,求解相关参数,完成合理的路径规划。五次多项式换道法表达式如下:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 \quad (15)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为五次多项式系数; x 为汽车换道过程中的纵向位移, m 。

弯道工况下汽车换道情况如图 4 所示。点 O' 为换道起点沿车辆横向方向,向外延伸与原车道边缘的交点。以 O' 为原点,原车道边缘切线方向为 x 轴,垂直 x 轴的水平方向为 y 轴,建立坐标系 $O'xy$ 。

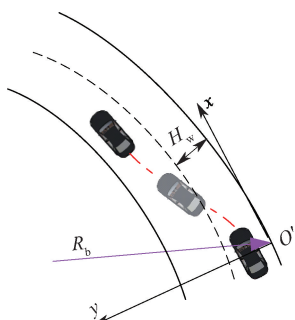


图 4 汽车换道

Fig. 4 Vehicle lane-changing schematic diagram

汽车换道过程中,道路曲率变化较小,采用曲线函数对道路进行拟合,弯道外边缘的表达式为:

$$y_e(x) = R_b - \sqrt{R_b^2 - x^2} \quad (16)$$

式中 R_b 为弯道外边缘的曲率半径, m 。

汽车在原车道中心线的行驶路径为:

$$y_1(x) = R_b - \sqrt{(R_b - 1/2H_w)^2 - x^2} \quad (17)$$

式中 H_w 为车道宽度, m 。

汽车换道至目标车道中心线的行驶路径为:

$$y_2(x) = R_b - \sqrt{(R_b - 3/2H_w)^2 - x^2} \quad (18)$$

假设换道起点 x 为 0,换道终点为 x_1 ,求解五次多项式的相关系数^[21],表达式如下:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y'(0) \\ y(x_1) \\ y'(x_1) \\ \frac{(1+y'(0)^2)^{2/3}}{y''(0)} \\ \frac{(1+y'(x_1)^2)^{2/3}}{y''(x_1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H_w}{2} \\ 0 \\ y_2(x_1) \\ y_2'(x_1) \\ R_b - \frac{H_w}{2} \\ R_b - \frac{3}{2}H_w \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(19)可得:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_w/2 \\ 0 \\ 1/2R_b - H_w \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$F_1 = R_b - H_w/2 \quad (21)$$

式中: $F_1 = R_b - H_w/2, m; F_2 = R_b - 3/2H_w, m$ 。

假设汽车纵向速度恒定^[22-23],则式(15)变为:

$$y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \quad (22)$$

式中 $b_0 = a_0, b_1 = a_1v_e, b_2 = a_2v_e^2, b_3 = a_3v_e^3, b_4 = a_4v_e^4, b_5 = a_5v_e^5$ 。

2.2 基于 Frenet 坐标系的坐标转换

弯道工况存在曲率,笛卡尔坐标系下,根据期望路径中的车辆横纵向位置,难以确定汽车的准确位置,导致车辆无法跟踪期望路径。基于 Frenet 坐标系的路径跟踪系统能够有效识别期望路径中的车辆横纵向位置。Frenet 坐标系以期望路径的切线方向建立纵向坐标轴,法向方向建立横向坐标轴,通过横向距离与纵向距离确定目标点的位置。将上层控制器规划的期望路径与汽车实际路径的横向误差 e_d 、横向误差变化率 \dot{e}_d 、航向误差 e_l 、航向误差变化率 \dot{e}_l 作为下层控制器的输入量。基于 Frenet 坐标系的坐标转换如图 5 所示。图 5 中, $R(s)$ 为期望路径中目标点在弧长 s 处的位置; θ_r 为 $R(s)$ 的方位角, ($^\circ$); T_r, N_r 为 $R(s)$ 的单位切向量、单位法向量。Frenet 坐标系下, $L(s, e_d)$ 为实际路径中车辆的位置, $L(s, e_d)$ 由弧长 s 与横向偏差 e_d 获得; θ_x 为 $L(s, e_d)$ 的方位角, ($^\circ$); T_x, N_x 为 $L(s, e_d)$ 的单位切向量、单位法向量; s 为弧长, m ; e_d 为 $R(s)$ 与 $L(s, e_d)$ 之间的横向偏差, m 。

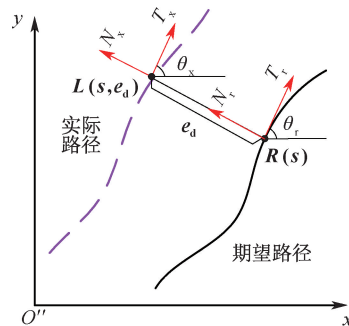


图 5 基于 Frenet 坐标系的坐标转换

Fig. 5 Coordinate transformation based on Frenet coordinate system

假设笛卡尔坐标系下, $L(s, e_d)$ 与 $R(s)$ 的坐标分别为 (x, y) 和 (x_r, y_r) ,根据正交基与 Frenet-Serret 公式,计算获得下层控制器输入状态量的表达式:

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} e_d \\ \dot{e}_d \\ e_t \\ \dot{e}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x - x_r) \cos \theta_r + (y - y_r) \sin \theta_r \\ v_e \sin(\theta_x - \theta_r) \\ \theta_x - \theta_r \\ \dot{\theta}_x - \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.3 基于 MPC 的下层控制器

汽车换道过程中, MPC 能够兼顾车辆稳定性与乘坐舒适性, 通过预测模型、滚动优化与反馈校正等环节, 控制车辆平稳跟踪期望路径。

基于车辆逆动力学模型, 将上层控制器输出的 $e_d, \dot{e}_d, e_t, \dot{e}_t$ 作为下层控制器的输入量, 即 $\boldsymbol{\psi} = [e_d, \dot{e}_d, e_t, \dot{e}_t]^T$, 前轮转角 δ_f 作为下层控制器的输出量。非线性的车辆控制系统计算效率低、控制精度差。采用近似线性化方法, 将车辆控制系统状态方程进行泰勒转换, 考虑转向时的横摆角速度, 忽略高阶项, 保留一阶项, 得到线性时变系统。此系统的计算效率高, 控制精度较好^[24]。

3 主动转向控制策略验证

弯道工况下, 当汽车高速行驶或前方存在遮挡物时, 毫米波雷达难以及时发现 VRU。若 VRU 相对汽车的距离小于最小主动制动安全距离, 则主动制动系统无法避免汽车与 VRU 发生碰撞。此时, 需利用主动转向规避碰撞风险。以电动自行车骑车人作为避

撞对象, 利用 Prescan、Carsim 与 Matlab/Simulink 软件的联合仿真, 验证主动转向控制策略的避撞效果。

3.1 仿真测试场景与仿真车辆

在 Prescan 软件中, 建立仿真测试场景, 设置弯道半径为 330 m, 车道宽度为 3.75 m; 选取 Audi A8 作为仿真车辆; 由于 Honda 摩托车与电动自行车的外形相似, 因此选用 Honda 摩托车模拟电动自行车。在 Carsim 软件中, 选取 D-Class/Sedan 的车辆模型, 设置动力学参数。将动力学参数导入 Prescan 软件中^[25]。在仿真车辆的前保险杠与后保险杠上, 分别安装 2 个 TIS 传感器, 用于模拟毫米雷达的特性, 探测车辆前方、后方的障碍物。

3.2 混杂工况下的仿真验证

基于目标车道状态、电动自行车的运动方向和运动速度, 构建 18 种混杂工况, 见表 1。

针对目标车道有前车无后车的情况, 设置前车车速为 50 km/h, 前车相距本车的初始距离为 30 m; 针对目标车道无前车有后车的情况, 设置后车车速为 50 km/h, 加速度为 0.8 m/s^2 , 后车与本车的初始车头位置齐平; 针对目标车道有前车有后车的情况, 设置前车车速为 60 km/h, 后车车速为 50 km/h, 后车加速度为 0.5 m/s^2 , 前车相距后车的初始距离为 15 m, 后车与本车的初始车头位置齐平。

表 1 18 种混杂工况

Table 1 18 mixed conditions

工况编号	目标车道状态	本车车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	电动自行车 运动方向	电动自行车初速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	电动自行车加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	有前车无后车	60	由外侧向内侧	20	0.5
2		60	由内侧向外侧	20	0.5
3		60	由外侧向内侧	30	-0.5
4		60	由内侧向外侧	30	-0.5
5		60	由外侧向内侧	25	0
6		60	由内侧向外侧	25	0
7	无前车有后车	60	由外侧向内侧	20	0.5
8		60	由内侧向外侧	20	0.5
9		60	由外侧向内侧	30	-0.5
10		60	由内侧向外侧	30	-0.5
11		60	由外侧向内侧	25	0
12		60	由内侧向外侧	25	0
13	有前车有后车	60	由外侧向内侧	20	0.5
14		60	由内侧向外侧	20	0.5
15		60	由外侧向内侧	30	-0.5
16		60	由内侧向外侧	30	-0.5
17		60	由外侧向内侧	25	0
18		60	由内侧向外侧	25	0

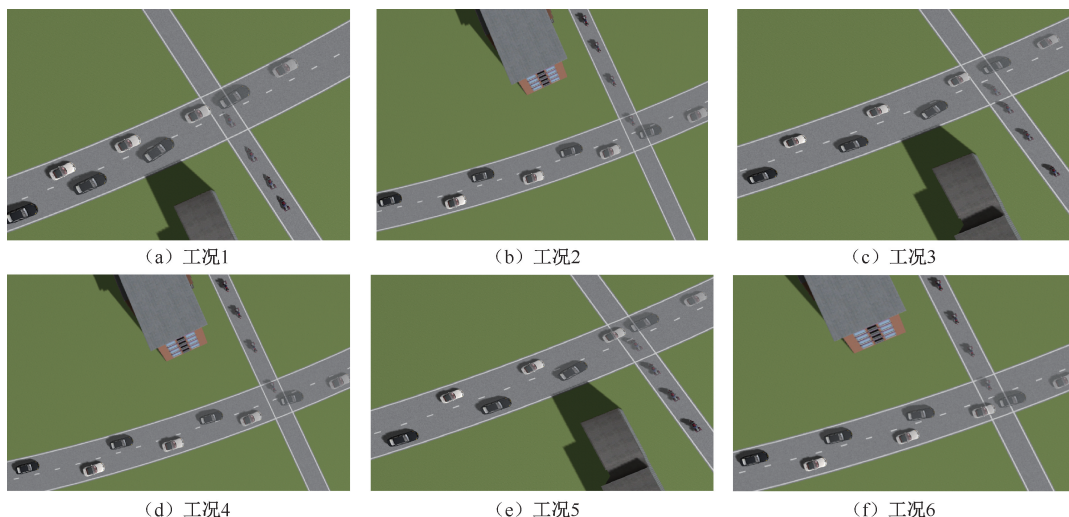


图6 前车、本车与电动自行车的行驶路径

Fig. 6 Motion trajectories of preceding vehicle, ego vehicle, and electric bicycle

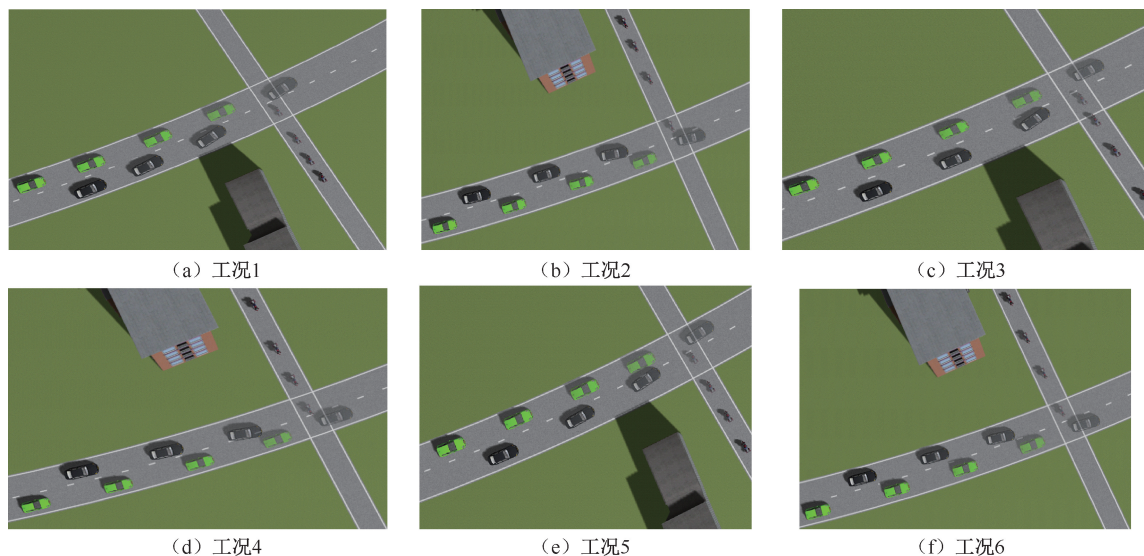


图7 本车、后车与电动自行车的行驶路径

Fig. 7 Motion trajectories of ego vehicle, following vehicle, and electric bicycle

3.2.1 有前车无后车的情况

工况1—工况6中,前车、本车与电动自行车的行驶路径如图6所示。图6中,三者的行驶路径皆未相交,证明主动转向控制策略能够在本车换道避撞过程中能够避免本车与电动自行车发生碰撞,并确保前车与本车正常行驶。

3.2.2 无前车有后车的情况

工况7—工况12中,本车、后车与电动自行车的行驶路径如图7所示。图7中,三者的行驶路径皆未相交,证明主动转向控制策略能够在本车换道避撞过程中能够避免本车与电动自行车发生碰撞,并确保本车与后车正常行驶。

3.2.3 有前车有后车的情况

工况13的仿真结果如图8a—图8c所示。汽车行驶过程中,前方存在遮挡物,前端TIS传感器未能及时探测到电动自行车。由图8a可知:当仿真时间 t 为6.84s时,前端TIS传感器探测到电动自行车,此时本车行驶至碰撞点的纵向路径长度 X 小于最小主动制动安全距离 S_0 ,主动制动系统无法避免本车与电动自行车发生碰撞。由图8b可知:当 t 为6.84s时,换道初始时刻下,本车与前车保持的弧长 l_f 大于本车与前车应保持的最小弧长 l_m^f ,本车与后车保持的弧长 l_r 大于本车与后车应保持的最小弧长 l_m^r ;此时,本车执行主动转向操作($K_s = 1$)。由

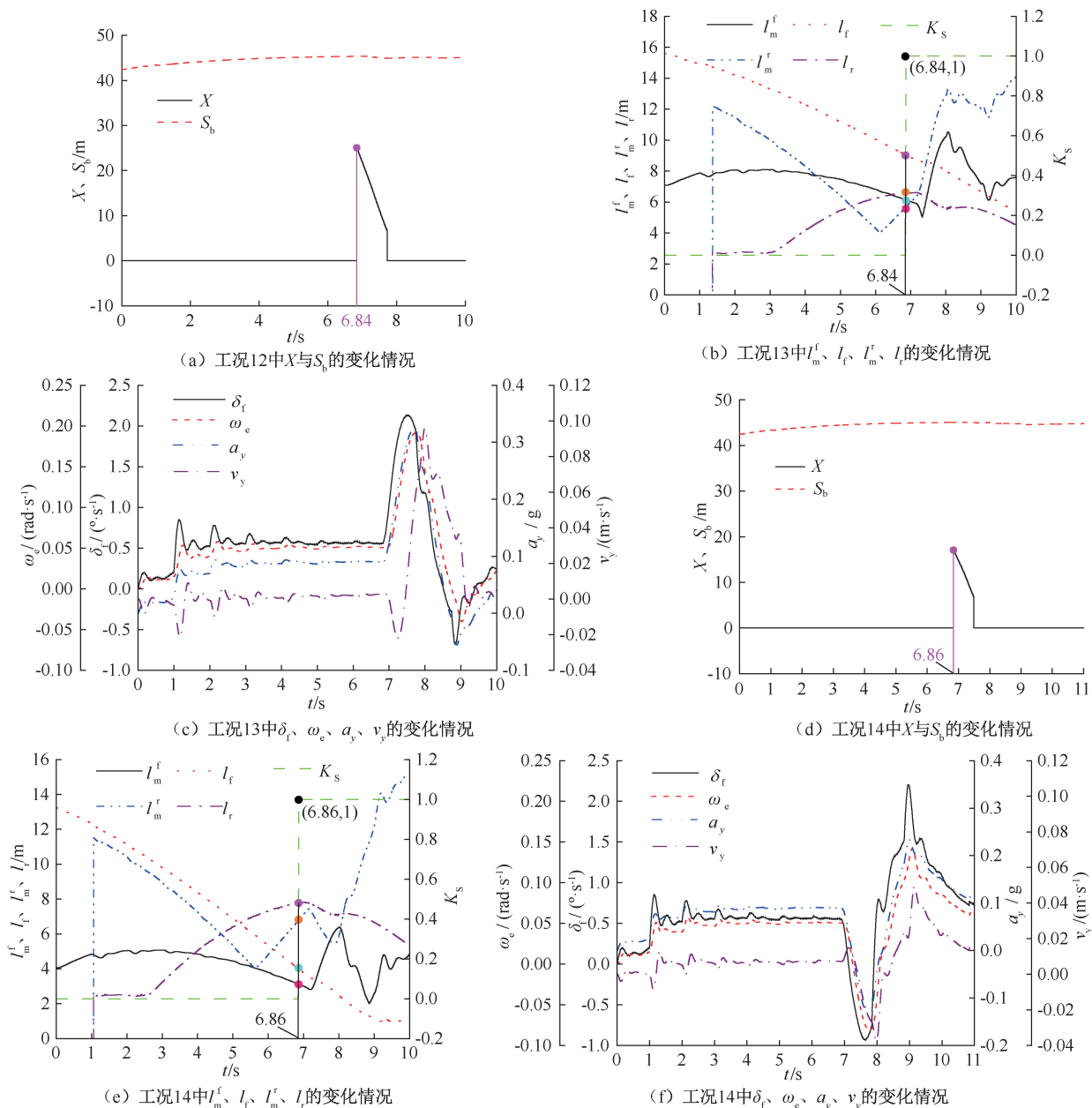


图 8 工况 13、14 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results in conditions 13 and 14

图 8c 可知:本车换道过程中,前轮转角 δ_f 始终小于 3° ,前轮转角变化较小,换道过程平缓;横摆角速度 ω_e 变化平滑且无较大突变,峰值小于 0.3 rad/s ,换道过程平稳;横向加速度 a_y 峰值小于 0.4 g ,其小于路面能提供的最大横向加速度, a_y 变化平缓;横向速度 v_y 较小,这说明本车换道过程中,车内乘员的乘坐舒适性较好^[26]。

工况 14 的仿真结果如图 8d—图 8f 所示。由图 8d 可知:当 t 为 6.86 s 时,前端 TIS 传感器探测到电动自行车,此时 X 小于 S_b ,主动制动系统无法避

免碰撞。由图 8e 可知:当 t 为 6.86 s 时,换道初始时刻下, I_f 大于 I_m^f , I_r 大于 I_m^r ;此时,本车执行主动转向操作($K_s = 1$)。由图 8f 可知:本车换道过程中, δ_f 位于 $[-1^\circ, 2.5^\circ]$ 之间; ω_e 变化平滑且无较大突变,其峰值小于 0.2 rad/s ;峰值小于 0.3 g , a_y 变化平缓;同时 v_y 较小,这说明本车换道过程中,乘员乘坐舒适性较好^[26]。

工况 13—工况 18 的避撞效果图如图 9 所示。工况 13—工况 18 中,主动转向控制策略能够避免本车与电动自行车发生碰撞,并确保前车、本车与后车均正常行驶。

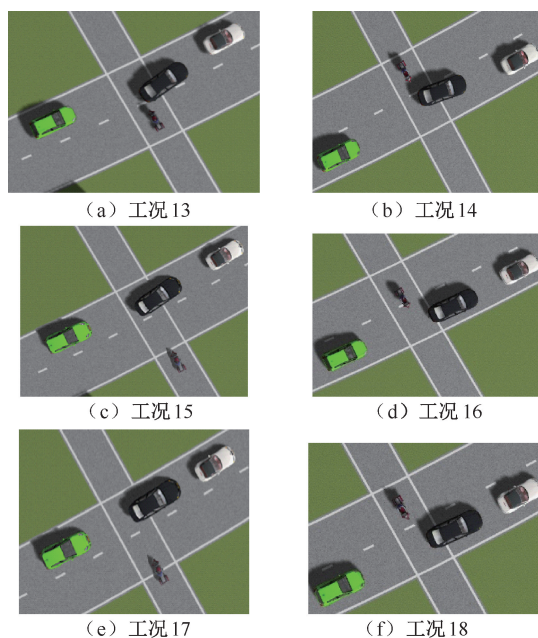


图9 避撞效果图

Fig.9 Collision avoidance diagram

4 结 论

1) 针对 VRU 由弯道外侧向内侧、由弯道内侧向外侧,以匀加速、匀减速、匀速运动状态横穿马路的情况,建立汽车与 VRU 的空间位置关系模型、安全评估模型及主动转向安全距离模型,从而提出一种主动转向控制策略。

2) 混杂工况下,主动转向控制策略均能够有效避免本车与电动自行车发生碰撞,同时确保本车换道过程中,目标车道中的前车与后车以及本车正常行驶,且本车的乘坐舒适性较好。这拓展了主动转向控制策略的保护范围,可为新型主动转向系统设计提供科学理论支撑。

3) 文中缺乏实车试验,且假设主动转向过程中车辆纵向速度恒定。今后将开展实车试验,以测试车辆紧急转向决策的计算效率,研究纵向加速度变化对主动转向避撞效果的影响。

参 考 文 献

- [1] FRIDMAN L, ROTHMAN L, HOWARD A W, et al. Methodological considerations in MVC epidemiological research[J]. *Injury Prevention*, 2021, 27(2): 155-160.
- [2] SHARMA N, DHIMAN C, INDU S. Pedestrian intention prediction for autonomous vehicles: a comprehensive survey[J]. *Neurocomputing*, 2022, 508: 120-152.
- [3] 世界卫生组织. 保护弱势道路使用者[EB/OL]. [2022-03-21]. <https://www.who.int/china/zh/activities/protecting-vulnerable-road-users>.
- [4] FUJIWARA T, KAZUTAKA T. Making the world safer: autonomous emergency braking systems enhance safety for senior drivers[J]. *Applied Economics Letters*, 2021, 29: 1177-1181.
- [5] WANG Xiaobo, LI Qin, ZHA Hongshan, et al. Integrated active steering control strategy for autonomous articulated vehicles[J]. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2020, 27(5): 565-599.
- [6] LI Junxiang, YAO Liang, XU Xin, et al. Deep reinforcement learning for pedestrian collision avoidance and human-machine cooperative driving[J]. *Information Sciences*, 2020, 532: 110-124.
- [7] FENG Jian, WANG Chunyan, XU Can, et al. Active collision avoidance strategy considering motion uncertainty of the pedestrian[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 23(4): 3543-3555.
- [8] YI Shuai, LI Hongsheng, WANG Xiaogang. Pedestrian behavior understanding and prediction with deep neural networks[C]. *14th European Conference on Computer Vision*, 2016: 263-279.
- [9] WANG Haoan, TOTA A, AKSUN-GUVENC B, et al. Real time implementation of socially acceptable collision avoidance of a low speed autonomous shuttle using the elastic band method[J]. *Mechatronics*, 2017, 50: 341-355.
- [10] WANG Pengwei, GAO Song, LI Liang, et al. Automatic steering control strategy for unmanned vehicles based on robust backstepping sliding mode control theory[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 64984-64992.
- [11] CHOI C, KANG Y. Simultaneous braking and steering control method based on nonlinear model predictive control for emergency driving support[J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2017, 15(1): 345-353.
- [12] WANG Hengyang, LIU Biao, PING Xianhao, et al. Path tracking control for autonomous vehicles based on an improved MPC[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 161064-161073.
- [13] CHEN Shuping, XIONG Guangming, CHEN Huiyan, et al. MPC-based path tracking with PID speed control for high-speed autonomous vehicles considering time-optimal travel[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(12): 3702-3720.
- [14] 王玉琼,高松,王玉海,等. 高速无人驾驶车辆路径跟踪和稳定性控制[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2021,

55(10): 1 922-1 929.

WANG Yuqiong, GAO Song, WANG Yuhai, et al. Trajectory tracking and stability control of high-speed autonomous vehicle[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2021, 55(10): 1 922-1 929.

[15] 杨佩佩,熊坚,何扬帆. 公路小半径曲线路段驾驶人焦虑水平模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 227-232.

YANG Peipei, XIONG Jian, HE Yangfan. Anxiety level model of drivers on sharp circular curve road[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 227-232.

[16] 吴付威,付锐,王鑫,等. 驾驶人弯道安全行车特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 19-23.

WU Fuwei, FU Rui, WANG Xin, et al. Study on drivers' safe driving characteristics on curve road[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(4): 19-23.

[17] WURTS J, STEIN J L, ERSAL T. Collision imminent steering at high speeds on curved roads using one-level nonlinear model predictive control[J]. IEEE Access, 2021, 9: 39 292-39 302.

[18] 余嘉星, ALIASGHAR A, 裴晓飞, 等. 考虑路径平滑性和避撞稳定性的智能汽车弯道轨迹规划研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 656-663.

YU Jiaying, ALIASGHAR A, PEI Xiaofei, et al. Research on cornering trajectory planning for intelligent vehicle considering trajectory smoothness and stability for collision avoidance[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(5): 656-663.

[19] 李克强,熊辉,刘金鑫. 面向弱势道路使用者的多目标运动轨迹预测方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 298-315.

LI Keqiang, XIONG Hui, LIU Jinxin. Multiple object motion trajectory prediction for vulnerable road user[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(1): 298-315.

[20] 李威,钱宇彬,冯浩,等. 轿车-电动两轮车事故再演的参数敏感性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 49-55.

LI Wei, QIAN Yubin, FENG Hao, et al. Study on sensitivities of reconstruction system to parameters for collision between sedan and electric two-wheeler[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 49-55.

[21] ANALOOEE A, KAZEMI R, AZADI S. SCR-Normalize: a novel trajectory planning method based on explicit quintic polynomial curves[J]. Journal of Multi-body Dynamics, 2020, 234(4): 650-674.

[22] 来飞,黄超群. 智能汽车自动紧急转向避撞的跟踪控制方法对比研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 250-264.

LAI Fei, HUANG Chaoqun. Comparative study on tracking control methods for automatic emergency steering and collision avoidance of intelligent vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 250-264.

[23] ZHANG Chuanwei, GAO Peng, WANG Jianlong, et al. Research on active rear-wheel steering control method with sliding mode control optimized by model predictive[J]. IEEE Access, 2023, 11: 57 228-57 239.

[24] LEE J, CHOI S B. Integrated control of steering and braking for path tracking using multi-point linearized MPC[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(5): 3 324-3 335.

[25] GAO Feng, DUAN Jianli, HAN Zaidao, et al. Automatic virtual test technology for intelligent driving systems considering both coverage and efficiency[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 69(12): 14 365-14 376.

[26] 李杰,孔祥悦,王晓燕,等. 基于模型预测的主动转向智能无人车辆横向稳态控制[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(8): 812-819.

LI Jie, KONG Xiangyue, WANG Xiaoyan, et al. A lateral stability control strategy of active steering intelligent unmanned vehicle based on model predictive[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(8): 812-819.



作者简介: 洪亮 (1986—),男,江苏镇江人,博士,副教授,主要从事智能汽车安全与人体生物力学方面的研究。E-mail: loudly1986@126.com。