

# 考虑车辆横向主动安全的智能驾驶员模型

隋振<sup>1</sup> 梁硕<sup>1,2</sup> 田彦涛<sup>1,3</sup>

**摘要** 结合智能车面临的横向安全问题,设计了一种具有横向安全性的智能驾驶员模型.该系统由转向控制、速度控制和决策规划三个模块组成.该系统的主要作用包括:一是通过在转向控制中加入主要约束提高车辆在转向过程中的横向稳定性,减小车辆发生侧滑、侧倾、侧偏等风险;二是在换道场景下,决策规划单元合理分析交通环境中的车间距并计算出驶入临近车道的速度和轨迹,使智能车实现安全换道. CarSim/Simulink 仿真结果表明,该智能驾驶员系统提高了车辆行驶的横向安全性.

**关键词** 智能驾驶, 主动换道, 转向控制, 模型预测控制, 轨迹规划

**引用格式** 隋振, 梁硕, 田彦涛. 考虑车辆横向主动安全的智能驾驶员模型. 自动化学报, 2021, 47(8): 1899–1911

**DOI** 10.16383/j.aas.c190526

## Intelligent Driving Model Considering Lateral Active Safety of Vehicles

SUI Zhen<sup>1</sup> LIANG Shuo<sup>1,2</sup> TIAN Yan-Tao<sup>1,3</sup>

**Abstract** In this paper, an intelligent driver model with lateral safety will be designed to solve the lateral safety problems faced by intelligent vehicles. The system consists of three modules: steering control module, speed control module and decision-making module. The lateral safety problems include: firstly, the lateral stability of the vehicle in the steering process is improved by adding major constraints to the steering controller to reduce the risk of vehicle sideslip, roll and sideslip; secondly, in the lane-changing scenario, the decision-making module analyses the environment and calculates the speed and the trajectory of the lane-changing. The simulation results show that the intelligent driver model improves the lateral safety of the vehicle.

**Key words** Intelligent driving, active lane changing, steering control, model predictive control (MPC), trajectory planning

**Citation** Sui Zhen, Liang Shuo, Tian Yan-Tao. Intelligent driving model considering lateral active safety of vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(8): 1899–1911

驾驶员模型本质上即智能车辆的自动驾驶控制器,自动完成车辆在特定驾驶任务下的速度控制与转向.通常根据车辆运动的维度,驾驶员模型可以大致分为纵向驾驶员模型、横向驾驶员模型与复合驾驶员模型<sup>[1]</sup>.现如今最优控制理论、自适应控制理论与模型预测控制(Model predictive control, MPC)理论已成为当前驾驶员建模的主流方法.如

Yoshida 等<sup>[2]</sup>采取自适应控制理论建立驾驶员模型. Qu 等<sup>[3-4]</sup>提出了基于随机模型预测控制的驾驶员建模方法. Falcone 等<sup>[5]</sup>则利用线性时变模型预测控制算法建立了自动驾驶车辆的转向控制器,也可认为是横向驾驶员模型. Du 等<sup>[6]</sup>利用非线性模型预测控制(Nonlinear model predictive control, NMPC)实现车辆速度和转向的综合控制.未来随着人工智能技术的推进,基于机器学习技术在特定驾驶任务条件下建立驾驶员模型也逐渐引起了人们的重视.如 Amsalu 等<sup>[7]</sup>利用支持向量机对驾驶员在十字路口处的驾驶行为进行了分析与建模,对驾驶员在十字路口的行为进行准确的预测,并用于指导实际驾驶行为.

在智能驾驶员模型飞速发展的同时,车辆的主动安全也逐渐引起了人们的重视<sup>[8]</sup>.车辆的横向运动过程中主要面对的安全威胁包括:1)在车辆转向过程中,由于车辆系统的非线性和耦合性使其在高速、弯道或者在湿滑路面下极容易发生侧滑、侧翻、车道偏离等危险.2)在复杂交通环境中,因对交通

收稿日期 2019-07-14 录用日期 2019-11-15

Manuscript received July 14, 2019; accepted November 15, 2019

国家自然科学基金联合基金(U1664263),国家重点研发计划项目(2016YFB0101102)资助

Supported by National Natural Science Foundation Joint Fund Program of China (U1664263), National Key Research and Development Program of China (2016YFB0101102)

本文责任编辑 李力

Recommended by Associate Editor LI Li

1. 吉林大学通信工程学院 长春 130022 2. 中国航空工业集团公司北京长城航空测控技术研究所 北京 101111 3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室 长春 130022

1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022 2. Beijing Changcheng Aeronautic Measurement and Control Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd. (AVIC), Beijing 101111 3. Key Laboratory of Engineering Bionics of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022

场景中环境态势分析的不足, 导致和其他交通车辆发生碰撞事故.

本文研究的智能驾驶员模型主要解决两方面问题: 1) 针对高速、低路面附着系数以及转弯工况下, 通过设计模型预测控制器作为车辆转向控制器并考虑车辆的侧向加速度、横摆角速度、质心侧偏角和横向转移率等现实约束, 实现智能车辆在跟踪轨迹的同时提高侧向稳定. 这里所指的侧向稳定性即车辆在行驶过程中, 不发生侧滑或侧翻的极限性能, 提高侧向稳定性即减小车辆发生侧滑、侧翻的风险. 2) 在直线多车道的道路条件下, 通过分析一般工况下车辆换道行驶条件, 采用线性模型预测理论设计速度调整控制算法, 采用粒子群算法结合贝塞尔曲线设计轨迹发生器, 辅助智能车安全的实现自动换道的驾驶任务, 即在换道过程中不与环境车辆发生任意形式的碰撞.

### 1 智能驾驶员模型结构

人类驾驶车辆的本质, 从控制系统的角度出发, 可看做是人—车—路环境构成的闭环系统. 人类驾驶员通过分析交通环境, 通过大脑制定出车辆应行驶的速度和轨迹, 并驱动方向盘和踏板执行相应的驾驶任务. 这一系列流程可概括为驾驶员的感知、决策和执行. 介于驾驶员具有以上特征, 本文设计的在换道条件下的驾驶员模型结构如图 1 所示.

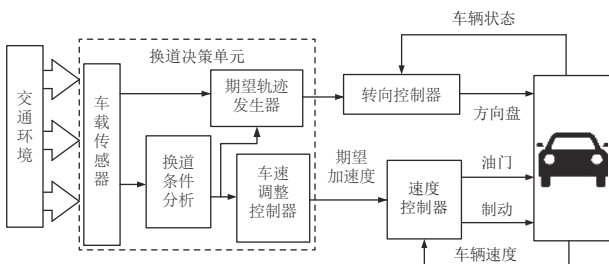


图 1 驾驶员模型结构  
Fig.1 The structure of the driver model

在该结构中, 驾驶员模型可划分为换道决策单元、转向控制器模块和速度控制器用来实现换道任务. 换道决策单元将结合具体车道环境, 合理分析换道条件、规划期望行驶的轨迹和车速避免事故的发生. 期望轨迹和车速信号作用于下游的转向控制器和速度控制器完成具体的转向和速度操控. 其中, 本方案中的速度控制器根据现有成果, 采用模糊神经网络算法计算指定工况下油门开度和制动压强实现对汽车加速度的控制<sup>[9]</sup>. 而转向控制器的设计, 保证轨迹跟踪精度的同时必须兼顾车辆自身的侧向稳定性. 这里所说的侧向稳定性指标包括质心侧偏角、

横摆角速度、侧向加速度和横向转移率. 因此, 转向控制器的设计本质上是以轨迹跟踪精度为控制目标, 以方向盘转角为控制量, 同时兼顾汽车质心侧偏角、横摆角速度、侧向加速度和横向转移率等稳定性约束的, 具有多目标多约束的最优控制求解问题<sup>[10]</sup>. 下面将分别就本驾驶员模型中的转向控制器以及决策规划模块的详细内容进行说明.

### 2 转向控制器设计

#### 2.1 车辆动力学模型

利用模型预测控制理论进行转向控制器的设计, 需要对被控对象进行清晰准确的描述. 本文选取两轮三自由度的非线性车辆动力学模型作为转向控制器设计的依据. 假设车辆在行驶过程中前轮转角与方向盘转角之间的传动比为线性关系, 且两个前轮的转向角度一致. 同时忽略车辆垂直与俯仰运动, 忽略空气动力学、侧向风与轮胎回正力矩对车身的作用. 模型结构如图 2 所示.

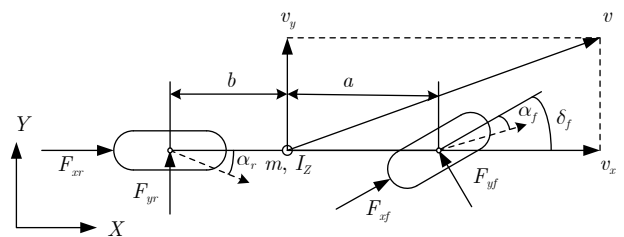


图 2 简化 3 自由度车辆动力学模型  
Fig.2 The model of the vehicle of 3DOF

通过对车辆模型的纵向、侧向、横摆和侧倾运动的受力分析, 可以推导出其动力学方程为

$$\begin{cases} ma_y = F_{xf} \sin \delta + F_{yf} \cos \delta + F_{yr} \\ ma_x = F_{xf} \cos \delta - F_{yf} \sin \delta + F_{xr} \\ I_z \dot{r} = (F_{xf} \sin \delta + F_{yf} \cos \delta)a - F_{yr}b \end{cases} \quad (1)$$

图 2 中的各个参数分别表示如下:  $a_x$  为车辆的纵向加速度 ( $m/s^2$ );  $a_y$  为车辆的侧向加速度 ( $m/s^2$ );  $\psi$  为车辆横摆角 (rad);  $r$  为车辆的横摆角速度 (rad/s);  $\delta$  是汽车前轮转角 (rad), 其与方向盘转角  $\delta_{sw}$  之间的线性系数  $G$ ;  $m$  是车辆的整体质量 (kg);  $I_z$  代表车辆  $z$  轴的转动惯量 ( $kg/m^2$ ).  $a$  和  $b$  分别为质心到车轮前后轴的轴距 (m). 通常,  $a_x = \dot{v}_x - rv_y$ ,  $a_y = \dot{v}_y - rv_x$ .  $v_x$  和  $v_y$  是车相对自身纵轴和横轴的速度 (m/s). 轮胎所受的纵向力  $F_{xi}$  与侧向力  $F_{yi}$  (N) 由路面提供, 通常在滑移率和轮胎侧偏角较小的情况下, 其可近似为



要状态的约束的形式. 系统的主要侧向约束指标包括质心侧偏角、横摆角速度、侧向加速度和横向转移率, 其具体形式为

$$\begin{cases} \beta_{\min} + \varepsilon_{\beta} z_{\beta \min} \leq \beta \leq \beta_{\max} + \varepsilon_{\beta} z_{\beta \max} \\ r_{\min} + \varepsilon_r z_{r \min} \leq r \leq r_{\max} + \varepsilon_r z_{r \max} \\ a_{y \min} + \varepsilon_{a_y} z_{a_y \min} \leq a_y \leq a_{y \max} + \varepsilon_{a_y} z_{a_y \max} \\ LTR_{\min} + \varepsilon_{LTR} z_{LTR \min} \leq LTR \leq LTR_{\max} + \varepsilon_{LTR} z_{LTR \max} \end{cases} \quad (9)$$

考虑车辆系统的实际运动极限, 转向控制系统输出量、控制增量和控制量也应满足约束

$$\begin{cases} \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max} \\ \Delta u_{\min} + \varepsilon_{\Delta u} z_{\Delta u \min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max} + \varepsilon_{\Delta u} z_{\Delta u \max} \\ u_{\min} + \varepsilon_u z_{u \min} \leq u \leq u_{\max} + \varepsilon_u z_{u \max} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\varepsilon_i$  为各个约束变量的松弛因子, 用于保证系统存在可行解. 为提高系统控制精度, 减小执行机构的运动幅度, 定义系统的性能指标为

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|(\eta(k+i) - \eta_{\text{ref}}(k+i))\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta u(k+i-1)\|_R^2 + \sum_i \|\varepsilon_i\|_{\rho}^2 \quad (11)$$

式中,  $N_p$  为预测模型的预测时域,  $N_c$  为预测模型的控制时域,  $\eta_{\text{ref}}$  为期望输出的侧向轨迹.  $Q$ ,  $R$  和  $\rho$  代表相应的权重系数. 根据滚动优化理论, 系统状态方程在预测时域和控制时域内不断迭代后得到的系统预测模型, 结合性能指标与约束条件, 经二次规划算法可计算出最优控制序列

$$u^*(k) = u^*(k-1) + [1 \ 0 \ \dots \ 0] \Delta U^*(k) \quad (12)$$

根据方向盘与前轮转角的比例系数  $G$ , 可计算出方向盘转角的最优解为

$$u_{SW}^*(k) = Gu^*(k) \quad (13)$$

### 3 换道决策系统设计

当车辆前方出现妨碍自身正常行驶的车辆或障碍物时, 为了提高驾驶效率, 人类驾驶员会通过变换车道的方式实现更好的驾驶体验<sup>[14]</sup>. 假设换道开始前交通车分布如图 4 所示.

在换道行驶过程中, 智能车  $M$  会因转向不足或安全间距过小导致和原车道前车 (Lead vehicle of the original lane,  $L_o$ ) 发生追尾或斜向剐蹭. 或因车速调整不当或安全间距不足导致和目标车道的前

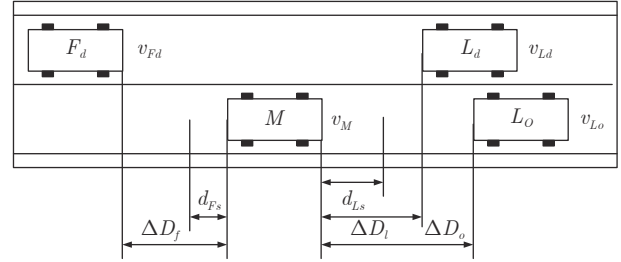


图 4 换道前车辆分布情况

Fig. 4 Distribution of the vehicles before lane change

车 (Lead vehicle of the destined lane,  $L_d$ ) 和后车 (Follow vehicle of the destined lane,  $F_d$ ) 发生追尾或剐蹭. 因此, 针对目标车道的换道行为, 本文将结合目标车道前后车的间距和速度情况做出分析, 计算出合理的行驶车速和跟车间距. 为避免因转向不足导致的与原车道前车相撞, 本驾驶员模型将结合前后两车的间距及其换道方向, 规划换道路径.

#### 3.1 换道车辆安全性分析

根据图 4 中换道前车辆分布, 设  $t_0$  为换道开始时刻,  $\Delta D_{L_o}$ ,  $\Delta D_{L_d}$  和  $\Delta D_{F_d}$  分别为智能车  $M$  与原车道前车、目标车道前车和后车的当前间距.  $d_{L_s}$  为车辆  $M$  与前车的期望安全间距,  $d_{F_s}$  为车辆  $M$  与后车的期望安全间距.  $v_i$  为环境中各车车速 ( $i = M, L_o, L_d, F_d$ ). 假设换道前后目标车道车辆的位置关系如图 5 所示.

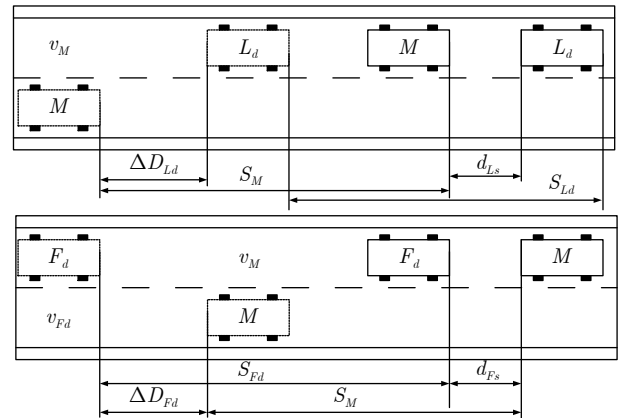


图 5 换道后车辆分布情况

Fig. 5 Distribution of the vehicles after lane change

图中虚线代表换道前各个车辆所处的位置, 实线为换道结束后各车辆对应的位置,  $S_i$  为各车在换道期间行驶的路程. 通常为使换道结束后前后两车的车距仍处在驾驶员期望安全间距之外, 车辆行驶过程应满足



$$\begin{cases} S_M + d_{Ls} \leq S_{Ld} + \Delta D_{Ld} \\ S_{Fd} + d_{Fs} \leq S_M + \Delta D_{Fd} \end{cases} \quad (14)$$

前车安全间距  $d_{Ls}$  通常根据前后两车车速  $v_M$  与  $v_L$ 、路面附着系数  $\Phi$  重力加速度  $g$  和与车间最小安全间距  $d_0$  来确定, 其不同环境下的大小为<sup>[15]</sup>

$$d_{Ls} = \begin{cases} v_M \tau_r - \frac{(v_M - v_L)^2}{2g\Phi} + d_0, & a_L < 0, v_M < v_L \\ (2v_M - v_L)\tau_r + \frac{(v_M - v_L)(v_M + v_L - 2)}{2g\Phi} + d_0, & v_L < v_M \\ v_M \tau_r + \frac{v_M^2 - v_L^2}{2g\Phi} + d_0, & a_L < 0, v_L < v_M \\ \tau_r v_M + d_0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

上式中  $d_0$  的定义参阅文献 [15], 其形式为

$$d_0 = d_{Fs} = k \frac{c}{\Phi + d} \quad (16)$$

式中,  $c$  和  $d$  为一常量, 在本文中定义  $c = 1.8$ ,  $d = 0.17$ .  $k$  为反映驾驶员实际意图的系数.

假设车辆  $M$  的加速度为  $a$ , 通常情况下, 车辆  $M$  当前所处的车流中各车车速可大致划分为:

**工况 1.**  $v_M > v_{Ld} > v_{Fd}$ , 此时目标车道车速低于自车车速, 智能车  $M$  向目标车道减速换道行驶.

**工况 2.**  $v_{Ld} > v_{Fd} > v_M$ , 此时智能车  $M$  为了不与目标车道后车发生剐蹭, 需加速换道.

**工况 3.**  $v_{Ld} > v_M > v_{Fd}$ , 此时智能车  $M$  可以匀速或加速向目标车道换道行驶.

定义驾驶员反应时间为  $\tau_r$ . 根据式 (14) 以及牛顿运动学公式分别计算出智能车  $M$  在以上 3 种情况下换道过程中采取的加速度上下限, 即  $a_{\min}$  与  $a_{\max}$ .

工况 1 中, 当  $\Delta D_{Ld} < d_{Ls}$  时, 此时由于  $L_d$  车速慢于本车, 且两车间距已经小于安全间距, 换道会增大两车相撞风险, 所以此工况下不做换道操作. 相反, 若车间距关系满足  $\Delta D_{Ld} \geq d_{Ls}$ , 根据式 (14) 可计算出车辆  $M$  的加速度上下限为

$$\begin{cases} a_{\min} = -\frac{(v_M + v_{Ld} - 2v_{Fd})(v_M - v_{Ld})}{2(d_{Fs} + v_{Fd}\tau_r - \Delta D_{Fd} - v_M\tau_r)} \\ a_{\max} = -\frac{(v_M - v_{Ld})^2}{2(\Delta D_{Ld} + v_{Ld}\tau_r - d_{Ls} - v_M\tau_r)} \end{cases} \quad (17)$$

在工况 2 中, 若此时换道时若车间距条件满足  $\Delta D_{Fd} < d_{Fs}$ , 由于目标车道后车车速较快且两车

距离已经小于二者的安全间距, 因此不做换道. 相反, 若  $\Delta D_{Fd} \geq d_{Fs}$  且  $\Delta D_{Ld} < d_{Ls}$ , 则

$$\begin{cases} a_{\min} = \frac{(v_{Fd} - v_M)^2}{2(\Delta D_{Fd} + v_M\tau_r - d_{Fs} - v_{Fd}\tau_r)} \\ a_{\max} = \frac{(v_M - v_{Ld})^2}{2(d_{Ls} + v_M\tau_r - \Delta D_{Ld} - v_{Ld}\tau_r)} \end{cases} \quad (18)$$

若  $\Delta D_{Fd} \geq d_{Fs}$  且  $\Delta D_{Ld} \geq d_{Ls}$ , 此时目标车道前车车速快于本车且两车间距已大于安全间距, 则车辆  $M$  拟采取的加速度范围为

$$\begin{cases} a_{\min} = \frac{(v_{Fd} - v_M)^2}{2(\Delta D_{Fd} + v_M\tau_r - d_{Fs} - v_{Fd}\tau_r)} \\ a_{\max} = a_{s \max} \end{cases} \quad (19)$$

在工况 3 中, 由于此时目标车道后车慢于自车车速, 因此智能车  $M$  无需考虑与其发生碰撞, 只考虑与前车的安全间距. 若  $\Delta D_{Ld} < d_{Ls}$ , 加速度范围满足:

$$\begin{cases} a_{\min} = 0 \\ a_{\max} = \frac{(v_M - v_{Ld})^2}{2(d_{Ls} + v_M\tau_r - \Delta D_{Ld} - v_{Ld}\tau_r)} \end{cases} \quad (20)$$

相反, 若满足  $\Delta D_{Ld} \geq d_{Ls}$ , 加速度范围为

$$\begin{cases} a_{\min} = 0 \\ a_{\max} = a_{s \max} \end{cases} \quad (21)$$

通常人类驾驶车辆过程中, 车辆实际行驶的极限加速度范围为:  $a \in [a_{s \min}, a_{s \max}]$ , 此处  $a_{s \min}$  与  $a_{s \max}$  是在保证车辆与驾驶员的舒适与稳定条件下加速度最小值与最大值. 将前文所述的安全换道加速范围与舒适性范围取交集, 即为本文设计驾驶员换道模型应采取的加速范围, 当分析模块计算出此范围为非空集合时, 代表当前工况下换道存在可行性, 即车速调整模块实际采取的加速区间为

$$u \in [u_{\min}, u_{\max}] = [a_{s \min}, a_{s \max}] \cap [a_{\min}, a_{\max}] \quad (22)$$

### 3.2 车速调整控制系统设计

通常, 驾驶员在驶入与  $L_o$  的安全间距之内, 首先要根据  $L_o$  的运动状态调整两车的间距和速度关系, 并同时判断目标车道是否存在换道空间, 当换道空间达成后以目标车道前车为跟车对象进行车速和轨迹的调整. 因此在本驾驶员模型车速调整控制中, 将以前后两车的运动关系为被控对象进行调整. 在实际车辆行驶过程中, 前后两车间距  $\Delta D$ 、速度差  $v_r$ 、前后车车速  $v_L$  与  $v_M$ , 前后车加速度  $a_L$  和  $a_M$ , 后车期望加速度  $a_{Md}$  之间满足

$$\begin{cases} \Delta \dot{D}(t) = v_L - v_M = v_r \\ \dot{v}_r = a_L - a_M \\ \dot{v}_M = a_M \\ \tau \dot{a}_M + a_M = a_{Md} \end{cases} \quad (23)$$

将上式转换为状态空间表达式形式, 定义状态量  $x = [\Delta D \ v_r \ v_M \ a_M]^T$ , 控制量  $u = a_{Md}$ , 扰动量  $d = a_L$ , 系统输出  $y = [\Delta D \ v_r]^T$ , 上述方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_u u + B_d d \\ y = Cx \end{cases} \quad (24)$$

取采样周期  $T$ , 取增量式进行算法设计, 因此系统离散化后结果为

$$\begin{cases} \Delta X(k+1) = A_d \Delta X(k) + B_{du} \Delta u(k) + B_{di} \Delta d(k) \\ Y(k) = C_d \Delta X(k) + Y(k-1) \end{cases} \quad (25)$$

其中,  $A_d = I + TA$ ,  $B_{du} = TB_u$ ,  $B_{di} = TB_i$ ,  $C_d = C$ . 同样采用滚动优化思想, 对状态方程在预测时域  $p$  和控制时域  $m$  内迭代出系统的预测方程. 为了满足所要达到的控制目标, 定义控制器的参考输入  $r(k+i) = [D_{des}(k) \ 0]^T$ , 其中  $D_{des}(k)$  此处定义为期望安全间距  $d_{ls}$ , 期望两车速度差  $v_r$  为 0. 速度控制系统的性能指标与控制量约束为

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{i=1}^p \|(y(k+i) - r(k+i))\|_Q^2 + \\ & \sum_{i=1}^m \|\Delta u(k+i-1)\|_S^2 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max} \\ u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

式中,  $Q$  和  $S$  代表输出量与控制增量序列的权重矩阵. 同样利用二次规划算法计算出期望加速度的最优解  $a_{Md}^*(k)$ .

### 3.3 期望轨迹发生器的设计

为避免因转向不足导致和前车  $L_o$  的斜向刮蹭, 本驾驶员模型采用基于粒子群的贝塞尔曲线实施轨迹规划. 通常  $n$  次贝塞尔曲线可表示为

$$B(t) = \sum_{i=0}^n C_n^i P_i (1-t)^{n-i} t^i, \quad t \in [0, 1] \quad (27)$$

其中,  $P_i$  为曲线的关键点坐标. 在轨迹规划中, 轨迹规划的关键点的选取方式如图 6 所示.

图 6 显示了自车在换道开始前两车的位置关系. 设两车当前间距为  $\Delta D_{L_o}$ . 以实施左换道为例,

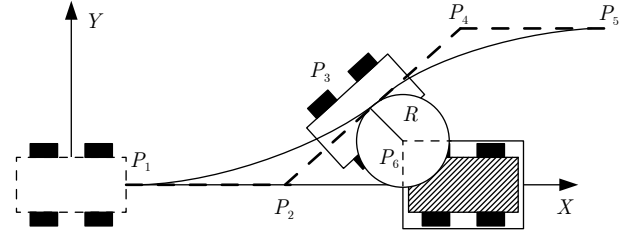


图 6 轨迹规划原理

Fig. 6 The principle of trajectory planing

定义各个主要关键点的位置为: 实验车  $M$  的车头中心坐标  $P_1(x_1, y_1)$ , 前车左后点  $P_6(x_6, y_6)$ . 根据车辆轨迹的曲线特性, 在轨迹中距离前车  $P_6$  点最近的一点必为该轨迹切点  $P_3(x_3, y_3)$ . 定义两点间的距离为  $R$ ,  $R$  也可看做是轨迹与前车间的最小距离.  $P_3$  同时也是以  $P_6$  为圆心的圆的外切点. 那么将  $P_3$  切线与两侧车道中心线的交点定义为  $P_3(x_3, y_3)$  和  $P_4(x_4, y_4)$ . 而目标车道上位于  $P_4$  前方的任意一点被定义为  $P_5(x_5, y_5)$ .

因此, 根据参考轨迹初步设置的 5 个关键点, 故可采用四次贝塞尔曲线来实现轨迹规划. 为使该参考轨迹更加平滑、均匀<sup>[16]</sup>, 易于跟踪, 因此本文选取优化性能指标为

$$\begin{aligned} \min J = & \omega_1 \int |\rho(x)| dx + \omega_2 \int |\dot{\rho}(x)| dx + \\ & \omega_3 \int |B(x) - S(x)| dx + \omega_4 |\theta| \end{aligned} \quad (28)$$

式中,  $\rho(x)$  与  $\dot{\rho}(x)$  为贝塞尔曲线的曲率及其导数,  $B(x)$  与  $S(x)$  分别为贝塞尔曲线函数和结构线函数,  $\theta$  为过  $P_3$  点的切线与  $x$  轴的夹角. 而  $\omega_i$  为各个性能指标的权系数. 为使性能指标尽快达到最优结果, 本文最终采用粒子群算法求解各个主要关键点的最优坐标  $P_i^*(x_i^*, y_i^*)$ , 最后根据贝塞尔曲线公式, 得出车辆换道过程的参考轨迹

$$\begin{cases} X^*(t) = \sum_{i=0}^4 C_4^i x_{i+1}^* (1-t)^{4-i} t^i \\ Y^*(t) = \sum_{i=0}^4 C_4^i y_{i+1}^* (1-t)^{4-i} t^i, \quad t \in [0, 1] \\ \psi^*(t) = \arctan^{-1} \frac{dY^*(t)}{dX^*(t)} \end{cases} \quad (29)$$

## 4 智能驾驶系统实验验证

本智能驾驶员模型将在 CarSim/Simulink 仿真环境下, 分别就车辆在轨迹跟踪以及自主换道两种交通场景进行实验验证. 实验车辆为 CarSim 2016 中的 D-Class 型轿车.

### 4.1 智能车轨迹跟踪与侧向稳定性验证

为验证本模型转向控制算法的可靠性, 本文分别对该驾驶员模型在高速、低路面附着系数以及弯道三种工况下驾驶员模型转向控制器进行验证. 分别对无约束模型预测控制器和本文采用的带约束模型预测控制器的控制效果进行对比说明.

#### 工况 1. 高速双移线工况.

此工况定义车速 25 m/s, 路面附着系数为 0.9, 装备不同转向控制算法的智能车辆行驶轨迹和主要系统状态如图 7 所示.

#### 工况 2. 低路面附着系数双移线工况.

此工况定义车速 25 m/s, 路面附着系数为 0.5, 装备不同转向控制算法的智能车辆行驶轨迹和主要系统状态如图 8 所示.

#### 工况 3. 弯道路况.

此工况下, 定义车速 14 m/s, 路面附着系数为 0.9, 弯道曲率 0.25. 装备不同转向控制算法的智能

车辆行驶轨迹和主要系统状态如图 9 所示.

根据实验结果, 在工况 1 条件下, 无约束 MPC 在 25 m/s 车速下轨迹跟踪的能力较差, 其在变道过程中产生了震荡. 这是因为高速行驶中车辆的侧向加速度与质心侧偏角的变化幅度大, 且不受任何约束限制, 导致车辆在行车过程中发生了失稳现象. 而带约束 MPC 由于质心侧偏角、横摆角速度、侧向加速度和横向转移率受弹性约束, 因此其变化幅度更小, 更加平稳, 因而其在轨迹跟踪上的效果更好.

在工况 2 条件下, 定义车速依然保持 25 m/s 不变, 而路面附着系数减小至 0.5 时, 无约束 MPC 控制的智能车辆的轨迹跟踪效果愈发的变差, 其控制的车辆完全偏离了期望跟随的目标车道. 而车辆质心侧偏角、横摆角速度和侧向加速度也发生了大幅摆动, 稳定性变差, 而横向转移率也在某些时刻超过了 1 的极限值, 说明此时车辆有很严重的侧翻风险. 而带约束 MPC 控制的车辆尽管也偏离了原车

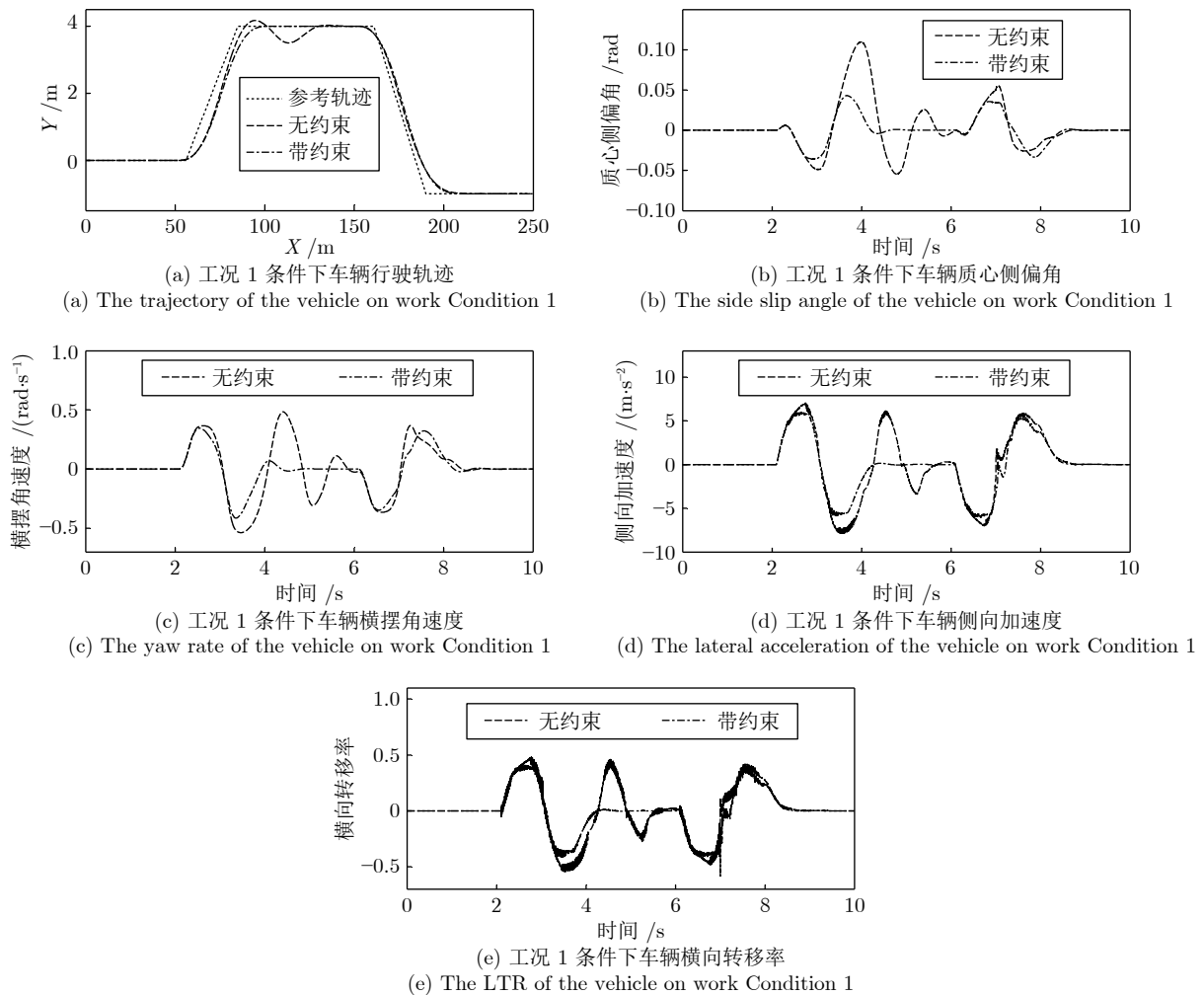


图 7 工况 1 条件下车辆行驶状态

Fig.7 The states of the vehicle on work Condition 1

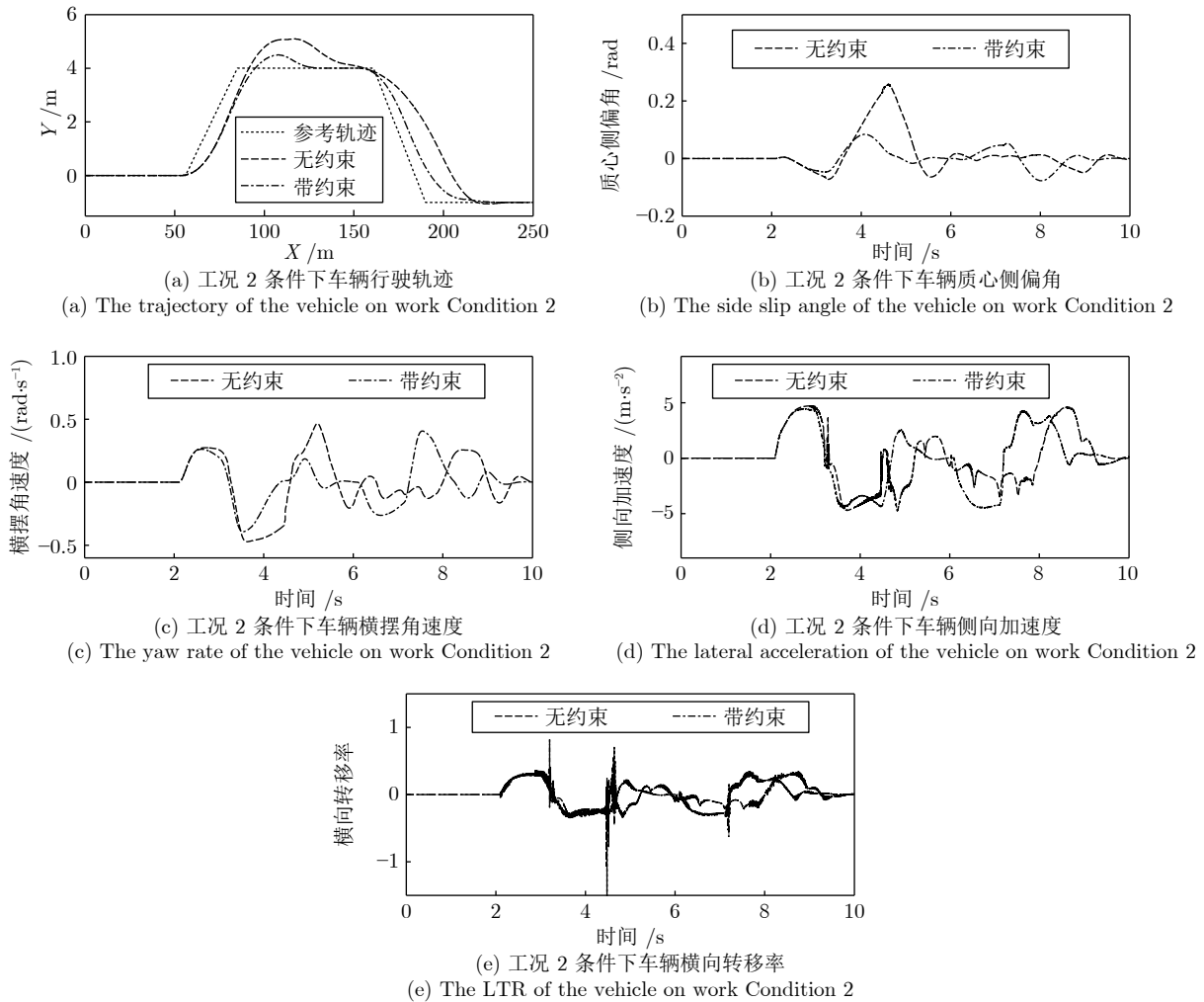


图 8 工况 2 条件下车辆行驶状态

Fig.8 The states of the vehicle on work Condition 2

道, 但很快恢复至正常轨迹中, 且其侧向稳定性更好.

工况 3 的结果显示, 带约束 MPC 控制的车辆较好地跟随了弯道路径, 而无约束 MPC 控制的实验车在弯道后半程由于弯道曲率方向的变化, 其偏离了期望轨迹, 质心侧偏角、横摆角速度、侧向加速度和横向转移率的幅度加大, 其发生侧倾、侧滑等风险更高.

#### 4.2 智能车自主换道实验验证

本节验证驾驶员模型在换道场景下的安全性、可靠性和有效性<sup>[17]</sup>, 检验当前交通环境下车辆换道行驶前后的侧向轨迹、车速变化情况以及实验车与各交通车辆之间的安全车距. 安全车距即智能车在行驶过程中, 与环境其他各个车辆的等效外接矩形的直线最短距离. 其效果如图 10 所示.

本文通过设置不同的安全间距、加速度及其增量范围和系统的反应时间来体现出智能车不一样的

驾驶方式, 详细参数设置如表 1 所示<sup>[18]</sup>.

表 1 中, 最小安全间距  $d_o$  由式 (16) 定义, 3, 2, 1 是式 (16) 中参数  $k$  的具体数值, 它反映了不同驾驶员对安全间距的要求. 在接下来实验中 0.9 为道路附着系数条件下,  $d_o$  的值分别为: 5.1, 3.4 和 1.7.

##### 工况 1. 第 1 种加速换道场景.

此工况下, 装备智能驾驶员模型的实验车  $M$  以 20 m/s 的速度正常行驶, 此时其前方 30 m 处交通车辆  $L_o$  正以 18 m/s 的速度匀速行驶. 其左前方车辆  $L_o$  与  $M$  初始间距 5 m, 车速 25 m/s. 左后方车辆  $F_d$  速度 20 m/s, 距  $M$  初始间距 10 m. 三种智能车执行加速超车的结果如图 11~15 所示.

如图所示, 三种智能车均自主完成了换道行为. 车速和间距均以目标车道前车为跟车对象进行调整并逐渐趋于稳定. 从速度曲线和轨迹曲线的分析可以看出,  $C$  车因安全间距  $d_o$  比  $A$ 、 $B$  两车小, 因此其启动换道的时刻最晚, 同时速度调整也越快. 根据



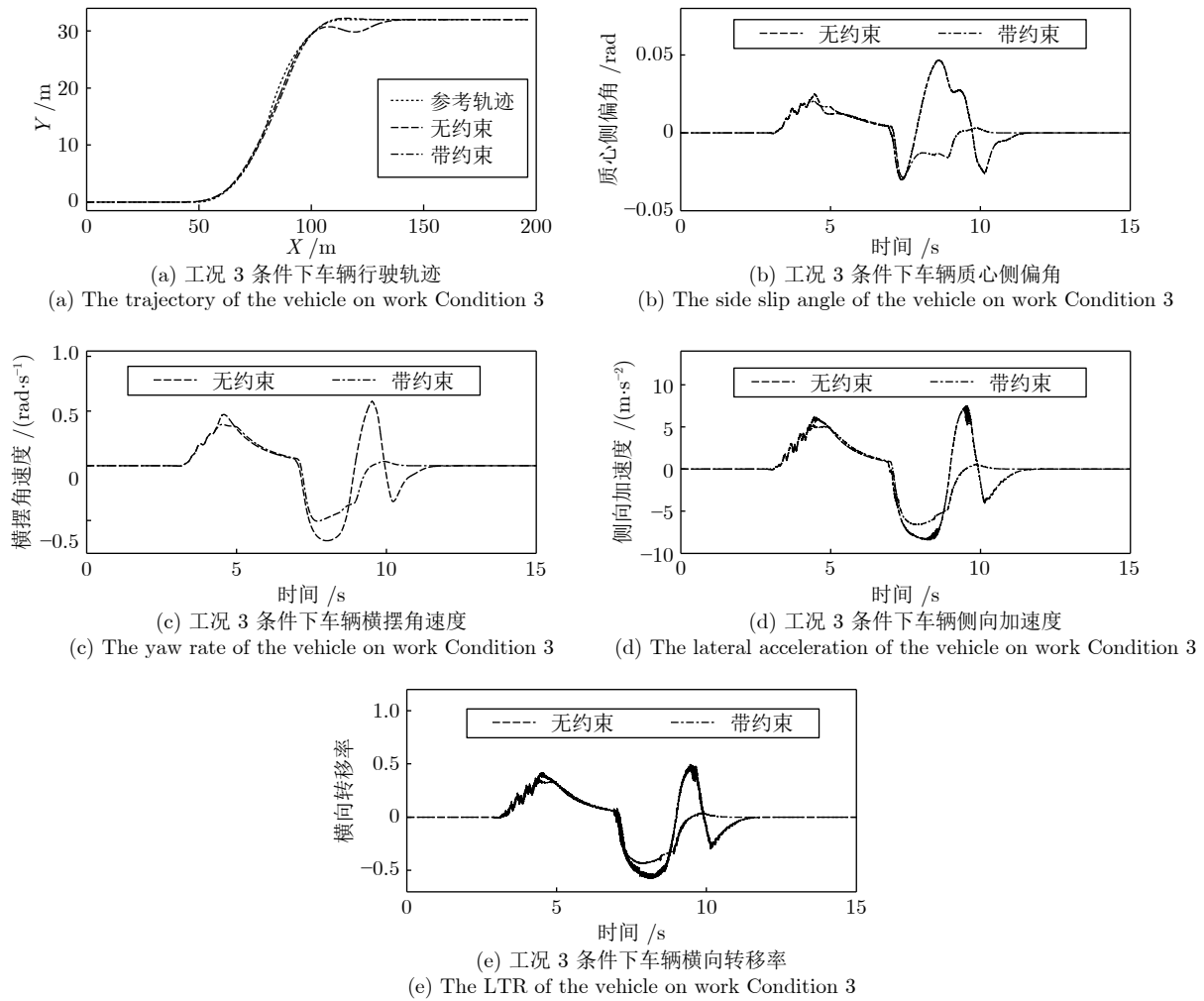


图 9 工况 3 条件下车辆行驶状态

Fig.9 The states of the vehicle on work Condition 3

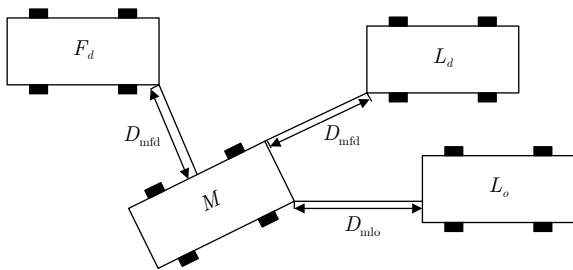


图 10 安全车距定义

Fig.10 The definition of the vehicles safety distance

速度曲线第 45 s 时间内, C 车率先减速, 目的是为保持和前车  $L_o$  安全间距, 而后发现邻车道具备换道空间进而加速驶入。

车间距的对比上, 各个实验车与前车  $L_o$  的最小间距一段时间内始终保持约 2 m, 说明当前实验车换道后正超越前车  $L_o$ , 此时两车在相邻车道上并列

表 1 智能驾驶员系统参数设置

Table 1 The definition of the intelligent driver system

实验车 $M$	Car A	Car B	Car C
最小安全间距 $d_o$ (m)	$d_o(3)$	$d_o(2)$	$d_o(1)$
加速度幅度 ( $m/s^2$ )	1.8	2.2	2.5
加速度增量 ( $m/s^2$ )	0.09	0.11	0.12
反应时间 (s)	0.4	0.7	0.9

行驶. 而换道结束后, 实验车 A、B、C 对车辆  $L_d$  做跟车行驶并趋于稳定. 由于各车执行换道的时间不同, 三台车对  $L_d$  的跟车间距有所差异. 由于 A、B 车同一工况下启动换道时间较早, 此时虽与  $L_o$  距离较远, 但离后车  $F_d$  距离较近, 最终迫使  $F_d$  提前减速, 使  $F_d$  与 A、B 车间的距离相比 C 车越来越大。

工况 2. 第 2 种加速换道场景

此工况下, 装备智能驾驶员模型的实验车  $M$  以 20 m/s 的速度正常行驶, 此时其前方 30 m 处交

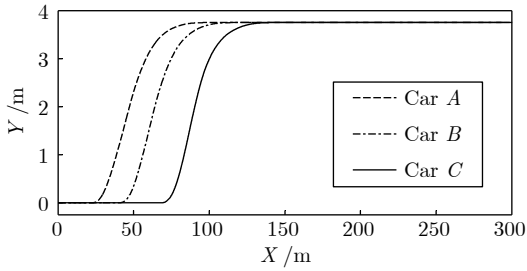


图 11 工况 1 换道轨迹

Fig.11 The trajectory of the vehicle on work Condition 1

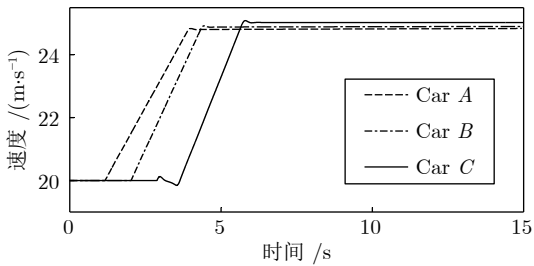


图 12 工况 1 速度控制

Fig.12 The velocity of the vehicle on work Condition 1

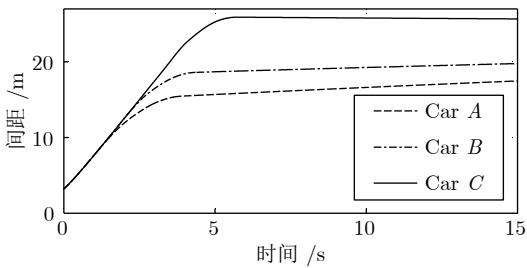


图 13 工况 1 智能车与原车道前车间距

Fig.13 The distance between the intelligent vehicle with the lead vehicle of the original lane on work Condition 1

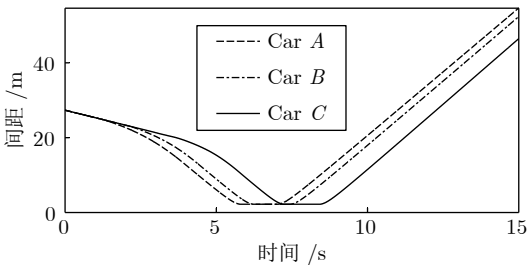


图 14 工况 1 智能车与目标车道前车间距

Fig.14 The distance between the intelligent vehicle with the lead vehicle of the target lane on work Condition 1

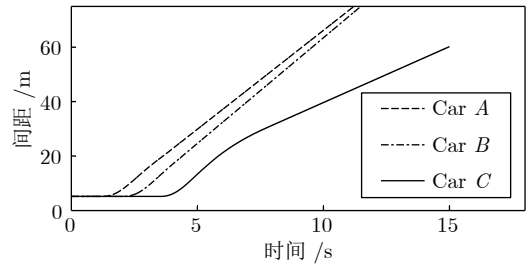


图 15 工况 1 智能车与目标车道后车间距

Fig.15 The distance between the intelligent vehicle with the follow vehicle of the target lane on work Condition 1

通车辆  $L_o$  正以  $18\text{m/s}$  的速度匀速行驶. 其左前方车辆  $L_o$  对  $M$  初始间距  $0\text{m}$ , 车速  $22.2\text{m/s}$ . 左后方车辆速度  $22.2\text{m/s}$ , 距  $M$  初始间距  $30\text{m}$ . 三种智能车执行加速超车的结果如图 16~20 所示.

从速度曲线和轨迹曲线的分析可以看出,  $A$  车和  $B$  车由于对车辆安全间距  $d_o$  期望较高, 因此提前减速对  $L_o$  进行跟车, 待与  $L_d$  的间距达到期望的安全距离以后开始换道行为.  $C$  车由于对前后方的安全车距  $d_o$  要求较低, 所以没有对  $L_o$  跟车减速, 而是直接执行换道. 三种车在换道过程中和环境车  $L_o$ ,  $L_d$  和  $F_d$  的位置关系与工况一大致相同. 且三辆车均以略小于前车  $L_d$  的车速稳定行驶, 以逐步拉大与  $L_d$  的间距, 保证纵向安全.

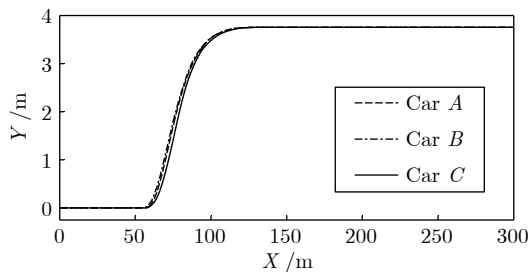


图 16 工况 2 换道轨迹

Fig.16 The trajectory of the vehicle on work Condition 2

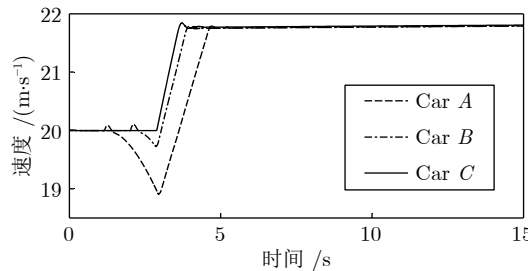


图 17 工况 2 速度控制

Fig.17 The velocity of the vehicle on work Condition 2

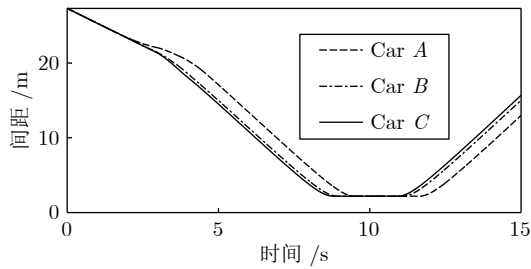


图 18 工况 2 智能车与原车道前车间距

Fig.18 The distance between the intelligent vehicle with the lead vehicle of the original lane on work Condition 2

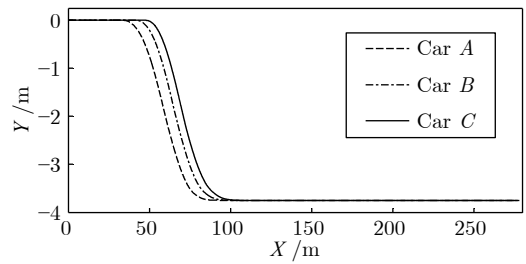


图 21 工况 3 换道轨迹

Fig.21 The Trajectory of the vehicle on work Condition 3

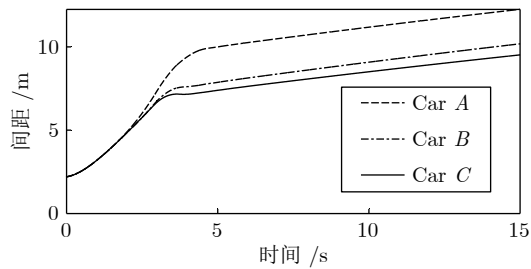


图 19 工况 2 智能车与目标车道前车间距

Fig.19 The distance between the intelligent vehicle with the lead vehicle of the target lane on work Condition 2

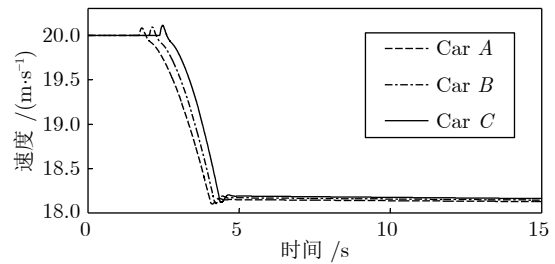


图 22 工况 3 速度控制

Fig.22 The velocity of the vehicle on work Condition 3

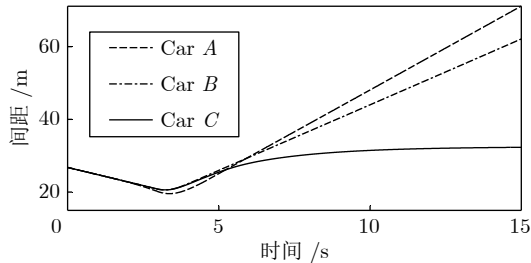


图 20 工况 2 智能车与目标车道后车间距

Fig.20 The distance between the intelligent vehicle with the follow vehicle of the target lane on work Condition 2

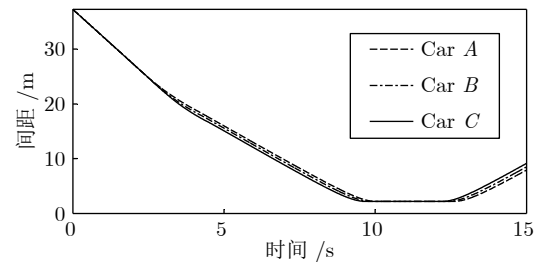


图 23 工况 3 智能车与原车道前车间距

Fig.23 The distance between the intelligent vehicle with the lead vehicle of the original lane on work Condition 3

### 工况 3. 减速换道场景

假设在工况 3 条件下, 装备智能驾驶员系统的实验车  $M$  以  $20\text{ m/s}$  的速度正常行驶, 此时其前方  $40\text{ m}$  处交通车辆  $L_o$  正以  $15\text{ m/s}$  的速度匀速行驶. 其右前方车辆  $L_d$  对  $M$  初始间距  $20\text{ m}$ , 车速  $18\text{ m/s}$ . 左后方车辆速度  $18\text{ m/s}$ , 距  $M$  初始间距  $10\text{ m}$ . 三种智能车辆执行加速超车的结果如图 21 ~ 25 所示.

从速度曲线和轨迹曲线的分析可以看出, 由于前车  $L_o$  和目标车道的车速均小于本车车速, 且  $L_o$  车速小于目标车道的前车  $L_d$ . 因此为了提高驾驶效

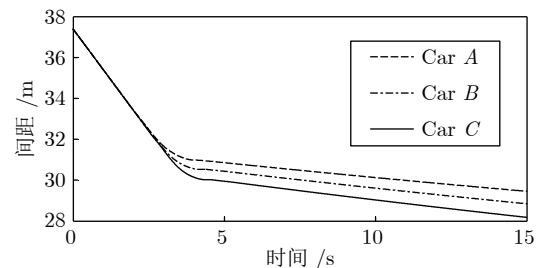


图 24 工况 3 智能车与目标车道前车间距

Fig.24 The distance between the intelligent vehicle with the lead vehicle of the target lane on work Condition 3

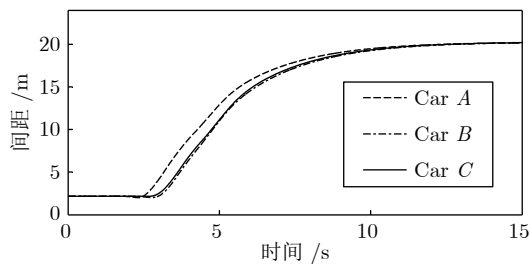


图 25 工况 3 智能车与目标车道后车间距

Fig. 25 The distance between the intelligent vehicle with the follow vehicle of the target lane on work Condition 3

率, 智能驾驶员模型选择了向车速较慢的一侧进行换道行驶. 此方案主要检验智能驾驶员模型在减速换道场景下的换道安全. 综合以上三种工况, 说明在同一种工况下, 具有不同参数的驾驶员模型往往可以体现出不同的驾驶方式.

## 5 结束语

本文将结合智能车在道路行驶中可能出现的安全问题, 设计了一种具有横向安全性的新型驾驶员模型. 该驾驶员模型从结构上由速度控制器、转向控制器和感知决策模块组成. 主要实现车辆准确跟踪轨迹并提高稳定性, 减小侧向安全风险, 实现自主安全换道.

首先, 转向控制器采用预测模型结合车辆质心侧偏角、横摆角速度、侧向加速度和横向转移率的约束条件相结合, 通过对性能指标与约束条件的二次规划求解, 得出车辆模型的最优控制率. 最终在高速、低路面附着系数以及转弯路况下, 转向控制器具有良好的轨迹跟踪性能和侧向稳定性.

其次, 为了避免在换道过程中与目标车道上的车辆发生碰撞, 通过对目标车道安全间距的分析, 确定出智能车执行换道的主要条件与驶入对象车道的参考加速度范围, 采用线性模型预测控制理论设计速度调整控制算法进行车速的控制. 为避免和原车道前车的发生碰撞, 采用粒子群算法计算最优的换道路径. 在三种换道工况下, 智能车均实现了通用场景下的主动换道行为, 并与环境车辆保持一定的安全间距. 不同驾驶员参数的设置, 也体现出了驾驶员模型在同一工况下的差异.

最后, 本文还存在以下改进工作:

1) 实验中设置不同驾驶员模型参数所引起的驾驶行为差异, 体现出实际行驶过程中不同驾驶员在同一路况往往体现出不一样的驾驶风格. 针对驾

驶风格的定义及其判定依据和主要参数指标目前依然缺乏客观统一的依据, 后期仍需通过对真实驾驶数据的分析进行探索.

2) 实际路况复杂多样, 论文研究难以对所有复杂路况进行一一验证. 目前本文所做工作也只能在一般条件下的换道过程进行检验. 如何使智能车适应更加极端的工况以及如何建立通用的换道检验标准也将成为本文接下来要进行的工作.

## References

- Li Li, Wang Fei-Yue, Zheng Nan-Ning, Zhang Yi. Research and developments of intelligent driving behavior analysis. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(10): 1014-1022 (李力, 王飞跃, 郑南宁, 张毅. 驾驶行为智能分析的研究与发展. 自动化学报, 2007, **33**(10): 1014-1022)
- Yoshida Y, Wang Q, Oya M, Okumura K. Adaptive longitudinal velocity and lane keeping control of four-wheel-steering vehicles. In: Proceedings of the 2007 SICE Annual Conference. Takamatsu, Japan: IEEE, 2007. 1305-1310
- Qu T, Chen H, Ji Y, Guo H Y, Cao D P. Modeling driver steering control based on stochastic model predictive control. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Manchester, UK: IEEE, 2013. 3704-3709
- Qu T, Chen H, Cao D P, Guo H Y, Gao B Z. Switching-based stochastic model predictive control approach for modeling driver steering skill. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(1): 365-375
- Falcone P, Tufò M, Borrelli F, Asgari J, Tseng H E. A linear time varying model predictive control approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems. In: Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, USA: IEEE, 2007. 2980-2985
- Du X X, Tan K K. Autonomous vehicle velocity and steering control through nonlinear model predictive control scheme. In: Proceedings of the 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Busan, Korea (South): IEEE, 2016: 1-6
- Amsalu S B, Homaifar A, Afghah F, Ramyar S, Kurt A. Driver behavior modeling near intersections using support vector machines based on statistical feature extraction. In: Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Seoul, Korea (South): IEEE, 2015. 1270-1275
- Chen Hong, Gong Xun, Hu Yun-Feng, Liu Qi-Fang, Gao Bing-Zhao, Guo Hong-Yan. Automotive control: The state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 322-346 (陈虹, 宫洵, 胡云峰, 刘奇芳, 高炳钊, 郭洪艳. 汽车控制的研究现状与展望. 自动化学报, 2013, **39**(4): 322-346)
- Kehtarnavaz N, Groszold N, Miller K, Lascoe P. A transportable neural-network approach to autonomous vehicle following. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, **47**(2): 694-702
- Chen Hong. *Model Predictive Control*. Beijing: Science Press, 2013. (陈虹. 模型预测控制. 北京: 科学出版社, 2013.)
- Gong Jian-Wei, Jiang Yan, Xu Wei. *Model Predictive Control for Self-Driving Vehicles*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.



- (龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.)
- 12 Zhao Yue-He. Research on Rollover Stability and Anti-Roll Control for Driver-Vehicle Closed-Loop System [Master thesis], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China, 2016.  
(赵曰贺. 驾驶员—汽车闭环系统侧翻稳定性分析及防侧翻控制 [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 中国, 2016.)
  - 13 Xu Yang, Lu Li-Ping, Chu Duan-Feng, Huang Zi-Chao. Unified modeling of trajectory planning and tracking for unmanned vehicle. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(4): 799–807  
(徐杨, 陆丽萍, 褚端峰, 黄子超. 无人车辆轨迹规划与跟踪控制的统一建模方法. 自动化学报, 2019, **45**(4): 799–807)
  - 14 Liu Yun-Tong, Shi Jian-Jun, Xiong Hui. *Traffic System Simulation Technology*. Beijing: People's Communications Publishing House, 2002.  
(刘运通, 石建军, 熊辉. 交通系统仿真技术. 北京: 人民交通出版社, 2002.)
  - 15 Yuan Qing. Adaptive Cruise Control Algorithm Based on Driving Behavior Analysis [Master thesis], Jilin University, China, 2018.  
(袁清. 基于驾驶行为分析的自适应巡航控制算法研究 [硕士学位论文], 吉林大学, 中国, 2018.)
  - 16 Qi Zhi. Study on Lane-Changing and Overtaking Control Method of Autonomous Vehicle [Master thesis], Yanshan University, China, 2017.  
(祁智. 无人驾驶车辆换道与超车控制方法研究 [硕士学位论文], 燕山大学, 中国, 2017.)
  - 17 Guo Jing-Hua, Li Ke-Qiang, Luo Yu-Gong. Review on the research of motion control for intelligent vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2016, **7**(2): 151–159  
(郭景华, 李克强, 罗禹贡. 智能车辆运动控制研究综述. 汽车安全与节能学报, 2016, **7**(2): 151–159)
  - 18 Lu J B, Filev D, Prakah-Asante K, Tseng F, Kolmanovsky I V. From vehicle stability control to intelligent personal minder: Real-time vehicle handling limit warning and driver style characterization. In: Proceedings of the 2009 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems. Nashville, USA: IEEE, 2009. 43–50

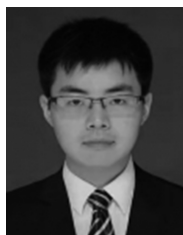


**隋 振** 吉林大学通信工程学院副教授, 博士. 主要研究方向为复杂系统建模优化与控制. 本文通信作者.

E-mail: suizhen@jlu.edu.cn

(**SUI Zhen** Ph.D., associate professor at the School of Communication Engineering, Jilin University.

His research interest covers complex system modeling optimization and control. Corresponding author of this paper.)



**梁 硕** 2019 年获得吉林大学通信工程学院硕士学位. 主要研究方向为电动汽车主动安全系统与智能辅助驾驶. E-mail: liangshuo0501@163.com

(**LIANG Shuo** Received his master degree from Jilin University in 2019. His research interest covers

electric vehicle active safety system and intelligent assisted driving.)



**田彦涛** 吉林大学通信工程学院教授. 1993 年吉林工业大学获得博士学位. 主要研究方向为复杂系统建模, 优化与控制, 电动汽车主动安全系统与智能辅助驾驶.

E-mail: tianyt@jlu.edu.cn

(**TIAN Yan-Tao** Professor at the

School of Communication Engineering, Jilin University. He received his Ph.D. degree from Jilin University of Technology in 1993. His research interest covers modeling and optimized control of complex systems, active safety systems of the electric vehicles, and advanced driver assistance systems.)