文章编号:1674-2974(2024)10-0047-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024198

考虑驾驶员不满度的车辆自主换道纵横向控制

郭烈[1,2†],卫立任[1],关龙新[1],谭镇宇[1]
(1. 大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 宁波研究院,浙江 宁波 315016)

摘 要:针对高速公路自主换道场景,开展考虑驾驶员不满度换道决策和轨迹跟踪控制的辅助驾驶功能研究.首先,在换道决策中考虑驾驶员心理因素,建立基于驾驶员不满度和最小安全距离的换道决策模型.然后,基于跟踪误差模型建立横向线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator,LQR)控制器,得到最优反馈前轮转角.由于存在权重矩阵$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$需要反复调试的问题,提出基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的横向LQR控制器,获得最优的权重矩阵$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$,提升算法的鲁棒性.同时建立纵向LQR控制器保持期望车速.利用PreScan、MATLAB/Simulink和CarSim联合仿真平台对自主换道策略进行验证,在不同固定车速换道工况下验证横向LQR控制器的鲁棒性和可靠性.在换道安全性不满足工况下,期望车速能够被纵向LQR控制器稳定跟随,最大车速误差绝对值为0.69 km/h.比较了LQR控制器和GA+LQR控制器的横向控制性能,采用GA+LQR控制器使横向和航向跟踪精度分别提升了66.7%和27%.结果证实纵向LQR控制器和优化后的横向LQR控制器在不同换道工况下均具有良好的跟踪精度.

关键词:自主换道;换道决策;线性二次调节器;遗传算法;驾驶员不满度
中图分类号:U461.91 **文献标志码**:A

Autonomous Lane-change Vertical and Horizontal Control for Vehicle Considering Driver Dissatisfaction

GUO Lie[1,2†], WEI Liren[1], GUAN Longxin[1], TAN Zhenyu[1]
(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: Research on assisted driving functions of lane-change decision-making and trajectory tracking control considering driver dissatisfaction is carried out for autonomous lane-change scenarios on highways. First, the psychological factors of drivers were taken into account in lane-change decision-making, and a lane-change decision-making model based on driver dissatisfaction and minimum safe distance was established. Then, a lateral Linear Quadratic Regulator (LQR) controller was established based on the tracking error model to obtain the optimal feedback front wheel steering angle. Due to the problem that the weight matrices $\boldsymbol{Q}$ and $\boldsymbol{R}$ needed to be debugged

* **收稿日期**:2023-07-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52372409, 52175078), National Natural Science Foundation of China (52372409, 52175078);国家重点研发计划资助项目(2022YFB2602305), National Key Research and Development Program of China (2022YFB2602305)
作者简介:郭烈(1978—),男,江西分宜人,大连理工大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: guo_lie@dlut.edu.cn

repeatedly, a lateral LQR controller based on the Genetic Algorithm (GA) was proposed to obtain the optimal weight matrices $\boldsymbol{Q}$ and $\boldsymbol{R}$, which in turn improves the robustness of the algorithm. The longitudinal LQR controller was also established to maintain the desired vehicle speed. Autonomous lane-change technology was validated using PreScan, MATLAB/Simulink and CarSim simulation platforms, and the robustness and reliability of the lateral LQR controller were verified under different fixed-speed lane-changing conditions. Under the condition of unsatisfied lane-change safety, the variable desired speed could be followed stably by the longitudinal LQR controller with a absolute value of maximum speed error of 0.69 km/h. Further comparing the lateral control performances of the LQR controller and GA+LQR controller, the lateral and heading tracking accuracies were improved by 66.7% and 27%, respectively, using the GA+LQR controller. The results confirm that the longitudinal LQR controller and the optimized GA+LQR controller have good tracking accuracies under different lane-change conditions.

Key words: autonomous lane-change; lane change decision; linear quadratic regulator; genetic algorithms; driver dissatisfaction

在高速公路交通流量日益增大的背景下,高速公路的交通安全面临更大压力.车辆换道是高速公路中较为普遍的驾驶行为,驾驶员对周围交通环境信息的错误判断而做出的换道操作往往容易引起交通事故.据统计,换道行为导致的交通事故占交通事故总数的4%~10%,因驾驶员对周围道路信息的误判而引起的交通事故占交通事故总数的75%[1].因此自主换道技术的研究具有重要的现实意义.

车辆换道决策模型主要分为2种,基于人工智能方法和基于规则方法.早期的车辆换道决策模型是Gipps模型[2],许多学者基于此决策模型展开了一系列研究,常用的有微观交通仿真(Microscopic Traffic Simulation,MITSIM)模型[3]和智能交通系统仿真(Simulation of Intelligent Transport Systems,SITRAS)模型[4]等.Chen等[5]提出了一种在不确定性下基于贝叶斯网络的拟人换道决策模型.Talebpour等[6]采用博弈论,提出了一种考虑流量的换道决策模型,该模型与基于规则的决策模型不同,考虑了换道的随机性和驾驶员的动态相互作用,提出的换道模型比基本模型有更高的真实性.Wang等[7]提出了利用蝙蝠优化的支持向量机决策模型,并与其他3种基于人工智能的决策模型进行比较,验证了改进后决策模型的优越性.然而,基于人工智能的方法需要大量的数据进行训练,可解释性差,同时无法获得较高的准确率.基于规则方法只考虑自车与周围车辆的关系,很少考虑驾驶员因素对换道决策模型的影响.李斌[8]以主车车速和前方车辆车速的差值和期望车速的比值作为换道意图的判断条件,但是该研究并未考虑对速度不满的积累,会导致频繁地产生换道意图.陈慧等[9]提出了考虑驾驶员不满度的换道决策模型,该研究指出,当驾驶员不满度积累超过预定阈值时,将产生换道意图,并取得了较好的效果.

轨迹跟踪控制是实现车辆安全行驶的重要环节,不仅要保证车辆安全、舒适地行驶,还要使车辆平稳地跟踪目标轨迹.目前,控制方法多数基于车辆运动学或动力学制定相关控制策略从而得到控制量.常用的控制算法有:比例-积分-微分(Proportional Integral Differentiation,PID)控制、模糊控制、滑模控制、模型预测控制(Model Predictive Control,MPC)、线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator,LQR)等.Kusuma等[10]利用帝国竞争算法整定PID参数,与PID控制器相比,所提出的优化算法的主要优点是更快、更准确,减小了车辆的偏航误差和横向误差.Saeedi[11]为了提高车辆的操纵性,提出了基于滑模算法的主动转向控制系统,跟踪车辆期望的横摆角速度和横向速度.李玉治等[12]提出一种前轮采用MPC,后轮采用考虑车速、质心侧偏角的模糊控制的控制策略,建立四轮转向控制器,在极限工况下的稳定性和跟踪精度得到了提升.虽然MPC控制器可以增加对状态量的约束,改善控制效果,但是增加了求解过程复杂性,导致实时性下降,同时,对约束的设置不当容易造成无解情况出现.Yang等[13]采用前馈控制器、预测控制器和LQR控制器组成横向控制,该方法能更好地适应复杂工况下智能车辆横向跟踪控制,有效提高距离误差控制和航向误差控制的精度.段敏等[14]提出了一种横纵向解耦控制策略,横向

控制采用LQR控制器,纵向控制采用MPC控制器,仿真结果表明,大曲率道路仍具有良好跟踪性能.在LQR控制器中,权重矩阵$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$数值的选取对控制效果有至关重要的影响.由于$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵并不是相互独立的,不同的参数数值相互影响,相互制约,因此选择合适的$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵是LQR控制器达到良好控制效果的关键.高琳琳等[15]为了改进LQR控制器,设计了$\boldsymbol{Q}$矩阵部分参数的计算规则,但是其他参数仍然需要靠积累的经验或者试探方法来设定,难以根据系统的特性来确定参数.

本文针对上述问题,基于高速公路环境,提出一种基于驾驶员不满度的车辆自主换道决策模型,考虑驾驶员在实际驾驶中的心理因素,将决策模型类人化.根据现有的驾驶员不满度模型和最小安全距离模型判断车辆换道的可行性,保证车辆在换道过程中的安全性.基于二自由度车辆动力学模型设计基于跟踪误差最优反馈的LQR控制器,设计前馈控制消除曲率导致的稳态误差.采用遗传算法对$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵进行离线优化,得到$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵的最优值,来提高传统LQR控制器的鲁棒性.基于位置误差和速度误差设计纵向LQR控制器,最终通过纵横向LQR控制器实现车辆的纵横向协同控制.在PreScan、MALTAB/Simulink和CarSim联合仿真平台上对所提出的换道决策模型和纵横向轨迹跟踪算法进行了验证.

1　换道决策模型

1.1　驾驶员不满度

车辆在行驶过程中,驾驶员需要根据前方车辆来调整自车车速.当前方车辆持续低速,致使自车无法达到预期速度,驾驶员产生厌烦心理,容易激发其换道意图.将上述驾驶员的厌烦心理称为驾驶员不满度,为了量化驾驶员不满度,采用速度不满的积累作为评价指标[9].

考虑驾驶员不满度在车辆行驶过程中的积累过程,当超过预定阈值时,驾驶员产生换道意图,驾驶员不满度表达式为:

$$H(k)=H(k-1)+i_{\mathrm{c}}\frac{V_{\mathrm{des}}-V_{\mathrm{F}}}{V_{\mathrm{des}}}T \tag{1}$$

式中:$H(k)$为当前时刻驾驶员不满度;$H(k-1)$为上一时刻驾驶员不满度;V_{des}为目标车速;V_{F}为前车车速;T为采样时间;i_{c}为增益系数,与前方车辆类型相关.在实际驾驶过程中,当前方车辆为大型车辆时,驾驶员更容易产生换道意图,驾驶不满度积累越快,i_{c}取值更大;当前方车辆为小型轿车时,则反之.

最小安全距离指的是前方车辆突然刹车或前方有障碍物时,自车在刹车后,自车能够停在距前车一定的距离,保证不会发生追尾行为.一般在停车时,自车会和前方障碍物保持一定距离,本文选取5 m.文献[16]对不同轿车在良好路面上进行制动试验,拟合出了“相对速度-自车速度-安全距离”的3D曲面图.本文以自车与前车具有固定相对速度情况下得到所述3D曲面图投影线的拟合式D_{safe}为:

$$D_{\mathrm{safe}}=D_{\mathrm{b}}+5 \tag{2}$$

式中:D_{b}=0.012 2 V+0.058 5V^2,D_{b}为车辆制动距离,V为自车的车速.

当车辆和前车的车距小于最小安全距离,并且跟车距离不断减小时,驾驶员不满度开始积累,当驾驶员不满度超过阈值H_{thr}时,驾驶员产生换道意图,车辆执行换道操作,车辆开始执行换道后,驾驶员不满度清零.

$$H(k)\geqslant H_{\mathrm{thr}} \tag{3}$$

1.2　换道可行性分析

为了简化换道场景,只考虑交通流密度较低的高速公路环境,同时道路曲率连续且比较小,以确保车辆高速行驶.当驾驶员产生换道意图后,需要判断周围的车辆情况是否可以进行换道操作.在换道过程中,要考虑当前车道前车、目标车道前车以及目标车道后车对自车的影响.一般情况下,由于车辆速度不满而向左侧换道,因此,在考虑换道可行性时将道路简化为同向两车道.由于右换道和左换道相似,因此,本文方法也适用于多车道.

简化后车辆换道场景如图1所示,图中M表示自车,L0为当前车道前车,Ld为目标车道前车,Fd为目标车道后车,S_1为自车M和前车L0距离,S_2为自车M和前车Ld距离,S_3为自车M和后车Fd的距离,V_{L0}为前车L0的速度,V_{Ld}为前车Ld的速度,V_{Fd}为后车Fd的速度.

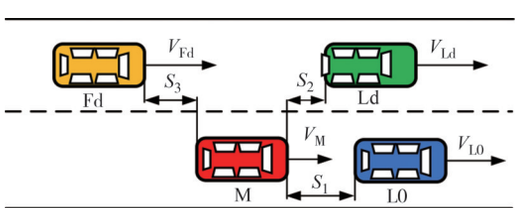


图1　简化后车辆换道场景

Fig.1　Simplified vehicle lane change scenario

在换道可行性分析中,通常用换道最小安全距离(Minimum Safety Spacing,MSS)模型,MSS表示在换道时刻需要和周围车辆保持的最小距离.MSS通过自车和周围车辆的距离、相对速度、加速度以及换道时间来判断换道是否安全[17].

在现有的研究中,车辆模型被简化为矩形模型、大圆模型、动态圆模型以及椭圆模型.本文采用图2所示的椭圆车辆模型,用椭圆的长半轴L_x和短半轴L_y描述不同方向的碰撞危险程度.

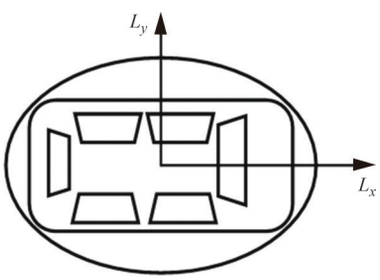


图2 椭圆车辆模型

Fig.2 Elliptical vehicle model

由于车辆的纵向长度对换道行为影响较大,因此采用椭圆长半轴L_x建立车辆模型,即

$$L_x = \frac{L}{2} + (1 - T_d)^{L/W}\frac{V_F}{V_R} \tag{4}$$

式中:W为车辆宽度;L为车身长度;V_R为后车的车速;T_d为驾驶风格的系数.T_d值越小,椭圆的长半轴越长,说明所包含的车辆安全行驶范围越大,驾驶员越谨慎,需要更大的安全距离.将驾驶员分为谨慎型、普通型和激进型,根据文献[18]选取3类风格的T_d值分别为0.2、0.5、0.8.

为了保证车辆换道安全,保证自车与自车道前车不发生斜向碰撞,因此需要满足:

$$D_{MSS} \geqslant S_M - S_{L0} + 2L_x + W\sin\theta \tag{5}$$

式中:D_{MSS}为最小安全距离;S_M为车辆M在换道过程中行驶的距离;S_{L0}为车辆L0在换道过程中行驶的距离;θ为车辆驾驶方向和车道线之间的夹角.

当车辆L0的车速大于车辆M的车速时,随着换道时间的增加,两车的间距会越来越大,换道行为不会引起两车碰撞,此时车辆L0和车辆M的最小安全距离$D_{MSS}(M,L0)$可设置为d,d一般取2~5 m[19],本文选取d为5 m.当车辆L0的车速等于车辆M的车速时,并且两车保持匀速行驶,两车的间距会保持恒定,$D_{MSS}(M,L0)$的大小由椭圆车辆模型的长轴决定.当车辆L0的车速小于车辆M的车速时,并且两车保持匀速行驶,此时两车的距离会逐渐缩小,$D_{MSS}(M,L0)$的大小取决于椭圆车辆模型的长轴和两车的相对车速.

$$D_{MSS}(M,L0) \geqslant (V_M - V_{L0})t_{lc} + L + 2(1 - T_d)^{L/W}\frac{V_{L0}}{V_M} + W\sin\theta \tag{6}$$

式中:t_{lc}为换道时间.

加速换道的其他两种情形和上述匀速换道情形相似,因此,本文仅给出车辆M和车辆L0匀速换道过程中的最小安全距离模型的计算过程.

1.3 换道决策流程

换道决策流程如图3所示.当自车遇到前方有车辆时,首先会判断与前车的距离是否大于最小安全距离,如果大于最小安全距离,则车辆继续保持跟驰模式;如果小于最小安全距离,则车辆会进入减速跟驰模式(最多减速至与前方车辆速度相同).与此同时,驾驶员不满度开始积累,当达到不满度阈值后,如果满足换道的安全性条件,则会执行换道操作,并清空驾驶员不满意度,否则继续减速跟随前车,驾驶员不满意度继续积累.当满足换道安全性条件,则会执行换道操作,并清空驾驶员不满意度;如果此时跟车距离大于最小安全距离,说明前方车辆加速,则清空驾驶员不满意度,并进入跟驰模式.

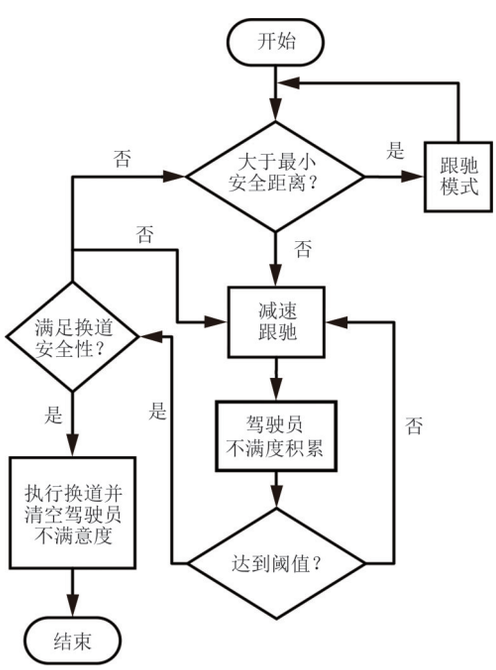


图3 换道决策流程

Fig.3 Lane change decision process

2　换道跟踪控制

2.1　车辆动力学模型

针对车辆的横向运动控制,建立图4所示的二自由度车辆模型,XOY为大地坐标系,xoy为固定于车身的坐标系,其中V为质心速度,u_1、u_2分别为车辆前、后轴的中心速度,v_y、v_x分别为车身坐标系下的横向速度和纵向速度,β为质心侧偏角.

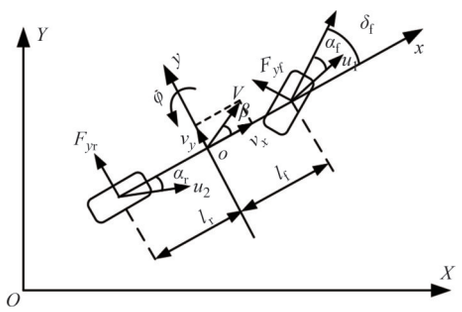


图4　二自由度车辆模型

Fig.4　Two-degree-of-freedom vehicle model

考虑车辆侧向和横摆动力学特性,并假设轮胎侧偏特性处于线性范围,建立如下车辆动力学模型:

$$\begin{cases} m(\dot{v}_y + v_x\dot{\varphi}) = 2c_{\mathrm{f}}\left(\dfrac{v_y + l_{\mathrm{f}}\dot{\varphi}}{v_x} - \delta_{\mathrm{f}}\right) + 2c_{\mathrm{r}}\left(\dfrac{v_y - l_{\mathrm{r}}\dot{\varphi}}{v_x}\right) \\ I_Z\ddot{\varphi} = 2l_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{f}}\left(\dfrac{v_y + l_{\mathrm{f}}\dot{\varphi}}{v_x} - \delta_{\mathrm{f}}\right) - 2l_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}}\left(\dfrac{v_y - l_{\mathrm{r}}\dot{\varphi}}{v_x}\right) \end{cases} \tag{7}$$

式中:l_{f}、l_{r}分别为前、后轮到质心的距离;c_{f}、c_{r}分别为前、后轮侧偏刚度;α_{f}、α_{r}分别为前、后轮的侧偏角;$\dot{\varphi}$为横摆角速度;δ_{f}为前轮转角;I_Z为绕Z轴的转动惯量,Z轴表示垂直方向,与XY平面垂直.

2.2　车辆横向误差模型建立

将建立的车辆动力学模型用误差变量重新定义,如图5所示,e_y为横向误差,e_φ为方向误差,R为道路半径.

由于质心侧偏角β较小,方向误差可近似为横摆角的误差,因此,横向误差和方向误差满足:

$$\begin{cases} \dot{e}_y = v_y\cos e_\varphi + v_x\sin e_\varphi \\ \dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - k_{\mathrm{r}}v_x \end{cases} \tag{8}$$

式中:k_{r}为道路曲率.由于方向误差足够小,则横向误差变化率为:

$$\dot{e}_y = v_y + v_x(\varphi - \varphi_{\mathrm{des}}) \tag{9}$$

由于$\ddot{\varphi}_{\mathrm{des}}$足够小,因此忽略此项.以横向误差、横向误差变化率、方向误差、方向误差变化率为状态变量,以前轮转角为控制变量,为后续建立控制器方便描述,将状态空间写成如下形式:

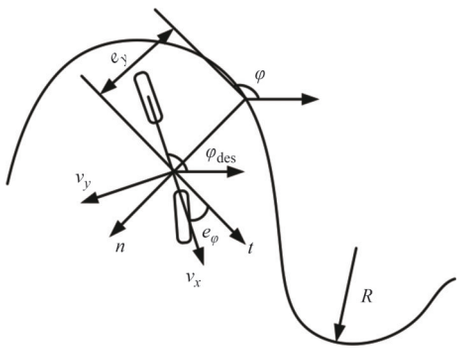


图5　道路信息

Fig.5　Road information

$$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{rr}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}} + \boldsymbol{B}u + \boldsymbol{C}\dot{\varphi}_{\mathrm{des}} \tag{10}$$

式中:

$$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{rr}} = \begin{bmatrix} \dot{e}_y & \ddot{e}_y & \dot{e}_\varphi & \ddot{e}_\varphi \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}} = \begin{bmatrix} e_y & \dot{e}_y & e_\varphi & \dot{e}_\varphi \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{2(c_{\mathrm{f}} + c_{\mathrm{r}})}{mv_x} & -\dfrac{2(c_{\mathrm{f}} + c_{\mathrm{r}})}{m} & \dfrac{2(l_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{f}} - l_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}})}{mv_x} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \dfrac{2(l_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{f}} - l_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}})}{I_zv_x} & -\dfrac{2(l_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{f}} - l_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}})}{I_z} & \dfrac{2(l_{\mathrm{f}}^2c_{\mathrm{f}} + l_{\mathrm{r}}^2c_{\mathrm{r}})}{I_zv_x} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\dfrac{2c_{\mathrm{f}}}{mv_x} \\ 0 \\ -\dfrac{2l_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{f}}}{m} \end{bmatrix},\ \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{2(l_{\mathrm{f}}c_{\mathrm{f}} - l_{\mathrm{r}}c_{\mathrm{r}})}{mv_x} - v_x \\ 0 \\ \dfrac{2(l_{\mathrm{f}}^2c_{\mathrm{f}} + l_{\mathrm{r}}^2c_{\mathrm{r}})}{I_zv_x} \end{bmatrix},\ u = \delta_{\mathrm{f}}.$$

2.3　横向LQR反馈控制器设计

将连续系统离散化,由积分中值定理可得:

$$x(t + \mathrm{d}t) - x(t) = \boldsymbol{A}x(\xi)\mathrm{d}t + \boldsymbol{B}u(\xi)\mathrm{d}t \tag{11}$$

式中:$\xi \in [t, t + \mathrm{d}t]$.

通常采用欧拉法将连续问题离散化,欧拉法一般可分为3种形式:向前欧拉法、中点欧拉法、向后欧拉法.设定$u(t)$为当前时刻控制量,$u(t+1)$为下一时刻控制量,则$u(t)$是LQR控制算法需要求解的控制量,而$u(t+1)$为未知量,因此对$u(\xi)$中ξ采用向前欧拉法,对$x(\xi)$中ξ采用中点欧拉法,可得:

$$x(t + \mathrm{d}t) \approx \left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{A}\mathrm{d}t}{2}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{I} - \frac{\boldsymbol{A}\mathrm{d}t}{2}\right)x(t) + \boldsymbol{B}u(t)\mathrm{d}t \tag{12}$$

式中:$\mathrm{d}t$为采样时间,取0.01 s;$\boldsymbol{I}$为单位矩阵.得到离散后的微分方程为:

$$x(t + 1) = \boldsymbol{A}_t x(t) + \boldsymbol{B}_t u(t) \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{A}_t=(\boldsymbol{I}-\frac{\boldsymbol{A}\mathrm{d}t}{2})^{-1}(\boldsymbol{I}-\frac{\boldsymbol{A}\mathrm{d}t}{2})$;$\boldsymbol{B}_t=\boldsymbol{B}\mathrm{d}t$.

根据所建立的车辆动力学模型,以横向速度、横摆角速度、横向误差以及方向误差为输入变量,设置控制变量$u=\delta_{\mathrm{f}}$,则LQR性能函数J_{LQR}为:

$$J_{\mathrm{LQR}}=\sum_{t=0}^{\infty}[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}x(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}u(t)] \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$分别为状态变量和控制变量的权重矩阵.$\boldsymbol{Q}$矩阵中变量q_1~q_4对应数值越大,表示该变量在J_{LQR}中越重要,$\boldsymbol{R}$矩阵中q_5数值越大,表示控制变量的约束越大.

$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵必须是正定或半正定的Hermit矩阵来确保优化的凸性,$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵分别为:

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}q_1 & & & \\ & q_2 & & \\ & & q_3 & \\ & & & q_4\end{bmatrix},\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}q_5\end{bmatrix}$$

LQR控制是能找到一个控制输入,从而让LQR性能函数J_{LQR}值最小,最终获得最优的前轮转角.设存在唯一最优控制变量$u^*(t)$使LQR性能函数达到J_{LQR}最值.则$u^*(t)$表达式为:

$$u^*(t)=-\boldsymbol{K}x(t). \tag{15}$$

反馈增益矩阵$\boldsymbol{K}$为:

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}. \tag{16}$$

$\boldsymbol{P}$为黎卡提方程的唯一正定解.黎卡提方程为:

$$\boldsymbol{A}_v^{\mathrm{T}}P+P\boldsymbol{A}_v-P\boldsymbol{B}_uR^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}P+\boldsymbol{Q}=0 \tag{17}$$

将状态空间和控制量代入式(15),即$x=\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}$,$u=\delta_{\mathrm{f}}$,则设计的控制系统前轮转角控制律为:

$$\delta_{\mathrm{f}}(t)=-\boldsymbol{K}\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}(t) \tag{18}$$

2.4 横向前馈控制器设计

将控制律代入系统状态方程,可得:

$$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{rr}}=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}+\boldsymbol{C}\dot{\varphi}_{\mathrm{des}} \tag{19}$$

由式(19)可以看出,当车辆跟随过弯道时,$\dot{\varphi}_{\mathrm{des}}$不为0.调节$\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$的特征值使LQR控制器系统趋于稳定,使$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{rr}}$为0,但无法保证$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{rr}}$和$\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}$同时为0,导致系统始终存在稳态误差.稳态误差为:

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}=-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})^{-1}\boldsymbol{C}\dot{\varphi}_{\mathrm{des}} \tag{20}$$

因此,需要通过前馈补偿LQR反馈控制器所求出的最优控制量,使系统在趋于稳定的同时,系统的横向稳态误差也为0.前轮转角的控制量为:

$$u=\delta_{\mathrm{f}}+\delta_{\mathrm{ff}}=-\boldsymbol{K}\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}+\delta_{\mathrm{ff}} \tag{21}$$

式中:δ_{ff}为前馈控制器输出的控制量.

当系统趋于稳定,$\dot{\boldsymbol{e}}_{\mathrm{rr}}$为0,则稳态跟随误差为:

$$\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr}}=-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{K})^{-1}(\boldsymbol{B}\delta_{\mathrm{ff}}+\boldsymbol{C}\dot{\varphi}_{\mathrm{des}}) \tag{22}$$

可以得到e_y和e_φ的表达式为:

$$\begin{cases}e_y=\dfrac{1}{k_1}\left\{\delta_{\mathrm{ff}}-\dfrac{\dot{\varphi}_{\mathrm{des}}}{v_x}\left[l_{\mathrm{f}}+l_{\mathrm{r}}-l_{\mathrm{r}}k_3-\dfrac{mv_x^2}{l_{\mathrm{f}}+l_{\mathrm{r}}}\left(\dfrac{l_{\mathrm{r}}}{2c_{\mathrm{f}}}-\dfrac{l_{\mathrm{f}}}{2c_{\mathrm{r}}}k_3-\dfrac{l_{\mathrm{f}}}{2c_{\mathrm{r}}}\right)\right]\right\}\\ e_\varphi=-\dfrac{\dot{\varphi}_{\mathrm{des}}}{v_x}\left(l_{\mathrm{r}}+\dfrac{l_{\mathrm{f}}}{l_{\mathrm{f}}+l_{\mathrm{r}}}\dfrac{mv_x^2}{2c_{\mathrm{f}}}\right)\end{cases} \tag{23}$$

当e_y为0时,前馈控制器的前轮转角控制量为:

$$\delta_{\mathrm{ff}}=\frac{\dot{\varphi}_{\mathrm{des}}}{v_{\mathrm{x}}}\left(l_{\mathrm{f}}+l_{\mathrm{r}}-l_{\mathrm{r}}k_3-\frac{mv_x^2}{l_{\mathrm{f}}+l_{\mathrm{r}}}\left(\frac{l_{\mathrm{r}}}{2c_{\mathrm{f}}}+\frac{l_{\mathrm{f}}}{2c_{\mathrm{r}}}k_3-\frac{l_{\mathrm{f}}}{2c_{\mathrm{r}}}\right)\right) \tag{24}$$

2.5 基于遗传算法的横向LQR控制器优化

遗传算法在车辆控制方面有诸多应用,Pizarro-Lerma等[20]利用遗传算法优化模糊控制器的隶属度参数,实现二自由度机器人跟踪期望位置,仿真对比证明了遗传算法优化的控制器跟踪效果较好.郭景华等[21]利用遗传算法优化模糊控制的隶属度参数,提高了无人车轨迹跟踪的准确性.遗传优化LQR在车道保持方面应用较少,但在倒立摆控制[22]、汽车主动悬架[23]等方面都有应用.以上说明了遗传算法优化LQR的可行性.本文对$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵的分量进行寻优,选用q_1~q_5作为基因进行实数编码.

设定种群的数量为60,遗传进化代数为100,交叉概率为0.8,采用约束自适应变异,设置变异概率为0.09,适应度值函数偏差为1×10^{-100}.根据对不同误差的重视程度,设定$\boldsymbol{Q}$和$\boldsymbol{R}$矩阵变量的约束范围,q_1和q_3约束范围为100~1 000,q_2和q_4的约束范围为1~50,q_5的约束范围为1×10^4~2×10^4.

图6为遗传算法迭代过程中平均适应度值、最佳适应度值以及最佳个体值,从图6可以看出,从第40代开始平均适应度值和最佳适应度值基本相同,说明至少需要40次迭代才能得到最佳个体.

横向LQR算法优化前的$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$矩阵分别为:

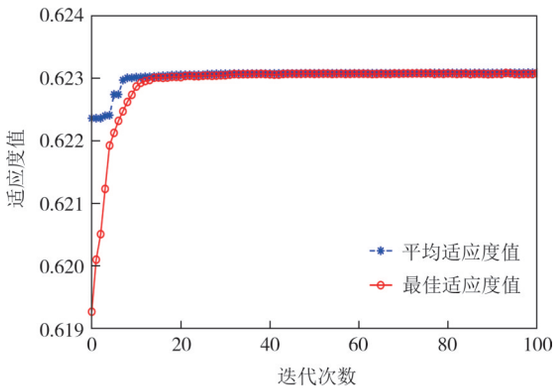
$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}10&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix},\ \boldsymbol{R}=1\ 000$$

采用遗传算法优化横向LQR算法后,$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$矩阵分别为:

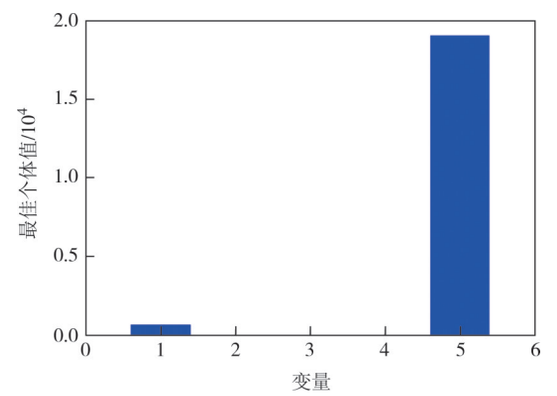
$$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{GA}}=\begin{bmatrix}867.620\ 8&0&0&0\\0&1.122\ 6&0&0\\0&0&6.013\ 9&0\\0&0&0&9.408\ 4\end{bmatrix},$$

$\boldsymbol{R}_{\mathrm{GA}}=19\ 025.150\ 0$

在仿真验证时,横向LQR算法均采用基于遗传算法优化后的$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$矩阵.



(a)适应度值



(b)最佳个体值

图 6　遗传算法迭代过程

Fig.6　Genetic algorithm iterative process

需要解释的是,在设计遗传算法时,将横向误差和方向误差作为性能指标函数,并进一步将该性能指标函数转换为适应度函数进行约束,优化得到的$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$矩阵使横向误差和方向误差往变小的方向进化.虽然人为调整也能够起到改善控制精度的作用,但是不同权重之间影响关系较难确认,会导致调整比较困难,因此,采用遗传算法最终达到提升控制性能的目的.

2.6　纵向 LQR 控制器设计

本文采用 LQR 作为纵向控制器的控制算法,将实际轨迹和期望轨迹的车速误差和位置误差作为状态空间变量.因此,建立状态空间并对其进行离散化处理,得到:

$$\begin{bmatrix}\dot{e}_{\mathrm{s}}(t+1)\\ \dot{e}_{\mathrm{v}}(t+1)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & \mathrm{d}t_2\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e_{\mathrm{s}}(t)\\ e_{\mathrm{v}}(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \mathrm{d}t_2\end{bmatrix}\left[\Delta a(t)\right] \tag{25}$$

式中:$e_{\mathrm{s}}(t)$和$e_{\mathrm{v}}(t)$分别为车辆在t时刻实际轨迹和期望轨迹的位置误差和车速误差;$\Delta a(t)$为加速度反馈控制量;$\mathrm{d}t_2$为采样时间,取 0.01 s.

定义$\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr2}}(t)=[e_{\mathrm{s}}(t),e_{\mathrm{v}}(t)]^{\mathrm{T}}$,根据横向误差和方向误差最小化,可得到性能指标$J_{\mathrm{LQR2}}$的表达式为:

$$J_{\mathrm{LQR2}}=\sum_{t=0}^{N}\left[\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr2}}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}_2\boldsymbol{e}_{\mathrm{rr2}}(t)+(a(t)+\Delta a(t))^{\mathrm{T}}\times \boldsymbol{R}_2(a(t)+\Delta a(t))\right] \tag{26}$$

式中:$\boldsymbol{Q}_2$为状态误差的权重矩阵;$\boldsymbol{R}_2$为控制量的权重矩阵;$\Delta a(t)$为当前时刻加速度反馈控制量,采用2.4节所述方法可求得.当前时刻前馈控制量的表达式如下:

$$a_{\mathrm{f}}(t)=\ddot{x}(t)-\dot{y}(t)\dot{\varphi}(t) \tag{27}$$

式中:$\ddot{x}(t)$为车辆纵向加速度;$\dot{y}(t)$为车辆横向速度;$\dot{\varphi}(t)$为横摆角速度.最终加速度控制量$a(t)=a_{\mathrm{f}}(t)+\Delta a(t)$

3　仿真验证与结果分析

3.1　联合仿真平台

本文设计了基于驾驶员不满意度的换道决策模块、基于五次多项式的轨迹规划模块、基于 LQR 的横、纵向控制模块.基于 PreScan、MATLAB/Simulink、CarSim 搭建联合仿真平台,其中 PreScan 模拟高速公路场景,CarSim 提供车辆动力学模型,利用 MATLAB/Simulink 搭建车辆自主换道决策、控制算法.在 PreScan 中,车辆 M 周围的环境车辆设置 1.2 节所述的换道场景,如图 7 所示.



图 7　PreScan 高速公路换道场景

Fig.7　Lane-change scenario of highway in PreScan

在 PreScan 中选用 Audi_A8 作为控制车辆,即 M 车,其整车参数如表 1 所示.为了保证后续和 CarSim 联合仿真,需要保证仿真频率的一致,因此,将 PreScan 中的仿真频率设置为 1 000 Hz,PreScan 场景仿真频率为 20 Hz.

设计的换道决策模块需要通过雷达探测车辆 M 与周围车辆的距离来判断是否满足换道的安全性,因此,需要给车辆 M 配置相应传感器.选用雷达传感器作为距离检测传感器.

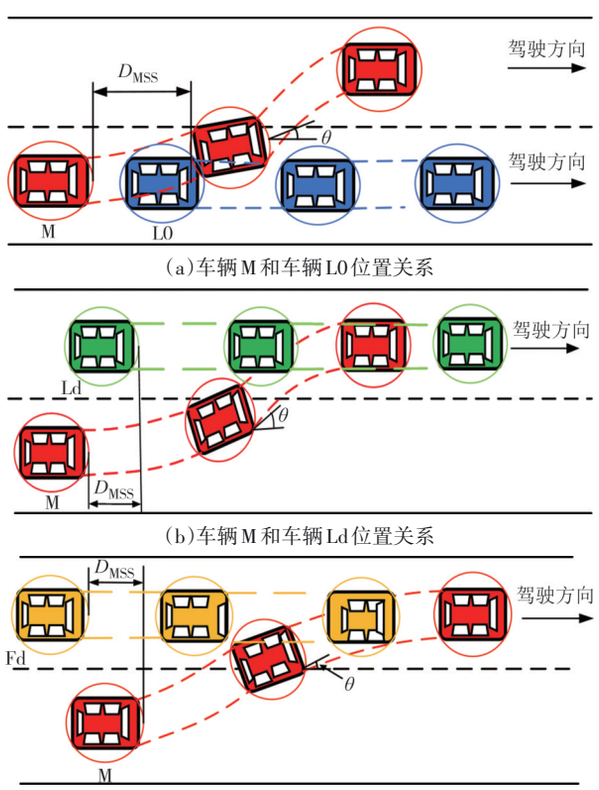
首选设置长距离雷达,最大探测距离为 150 m,水平探测角度为 10°,根据当前场景,设置最大检测

表 1 Audi_A8 整车参数

Tab.1 Vehicle parameters of Audi_ A8

参数	数值
簧上质量 m/kg	1 820
前轮到质心距离 l_f/mm	1 265
后轮到质心距离 l_r/mm	1 682
轴距 L/mm	2 947
前轮侧偏刚度 C_f/(N·rad^{-1})	−175 016
后轮侧偏刚度 C_r/(N·rad^{-1})	−130 634
质心绕 Z 轴转动惯量 I_Z/(kg·m^2)	4 095
车宽 W/mm	2 040

目标为 2. 长距离雷达的探测角度相对较小,当两侧的车辆距离较近时,则无法探测到该车辆,因此需要配置短距离雷达来探测两侧车辆,设置最大探测距离为 30 m,水平探测角度为 80°,设置最大检测目标为 2. 2 种雷达的波形均为角锥形. 由于车辆在制动过程中会出现前倾的现象,因此垂直探测角不宜过小,在此处设置为 10°. 由于换道过程中需要考虑与前、后车辆的距离,因此在车辆前方和后方均设置长距离和短距离雷达,共设置 4 个探测雷达,采样频率均为 20 Hz. 图 8 为换道过程中车辆间位置关系图,图中 D_{MSS} 表示最小安全距离.



(a)车辆 M 和车辆 L0 位置关系

(b)车辆 M 和车辆 Ld 位置关系

(c)车辆 M 和车辆 Fd 位置关系

图 8 换道过程中车辆间位置关系图

Fig.8 Relationship of each vehicle during lane-change process

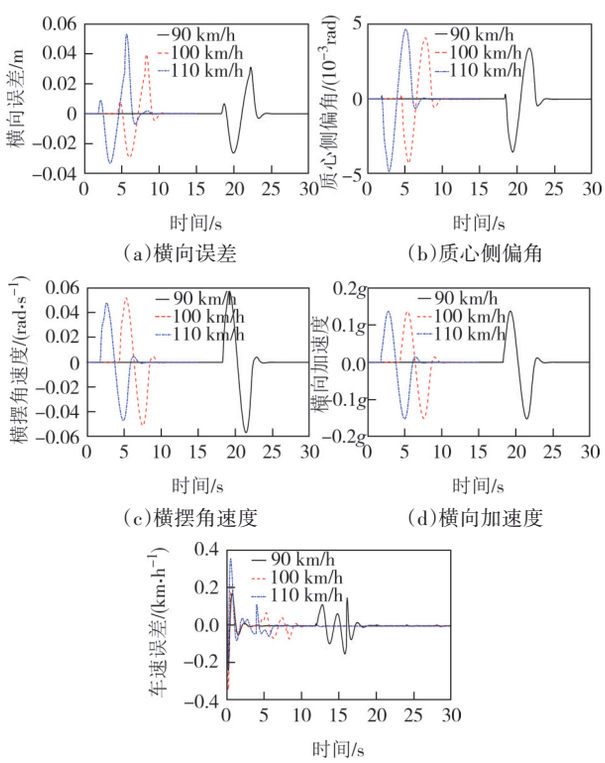
3.2 自主换道仿真与结果分析

3.2.1 不同车速换道工况

本节基于前文所搭建的横纵向控制器验证自主换道的安全性及控制精度. 换道轨迹采用五次多项式换道轨迹,换道时间为 4 s. 驾驶员不满意度 0.02 s 积累一次,即 T 为 0.02 s.

本节暂不考虑驾驶员不满意度的影响,当车辆 M 和车辆 L0 之间的距离小于最小安全距离时,便执行换道. 为了验证匀速换道情况下不同车速对横纵控制器的影响,设定车辆 M 分别以 90 km/h、100 km/h、110 km/h 的速度执行换道. 为了更好地表示换道安全性,设定车辆 Fd 和车辆 Ld 的车速与车辆 M 的车速相同,并保持匀速行驶. 车辆 Fd 初始时刻和车辆 M 相距 60 m,车辆 Ld 初始时刻和车辆 M 相距 30 m,车辆 L0 初始车速为 80 km/h,初始时刻和车辆 M 相距 80 m.

图 9 为车辆在 3 种车速下换道仿真结果,横向控制器采用 GA+LQR 控制器. 从图 9(a)可以看出,随着车速增加,横向误差增大,3 种车速下,最大横向误差绝对值分别为 0.028 m、0.034 m、0.054 m,均在可控范围内. 由图 9(b)可知,随着车速的增加,质心侧偏角也增大,但均在±0.005 rad 之间,说明车辆在换道过程中均稳定行驶. 因此,车辆在高速情况下,换道也具有较



(a)横向误差 (b)质心侧偏角

(c)横摆角速度 (d)横向加速度

(e)车速误差

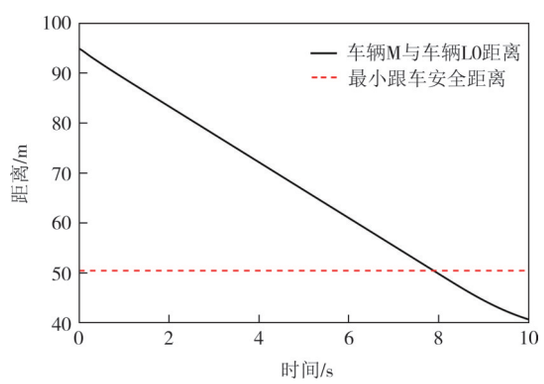
图 9 不同车速自主换道仿真结果

Fig.9 Simulation results of autonomous lane-change at different vehicle speeds

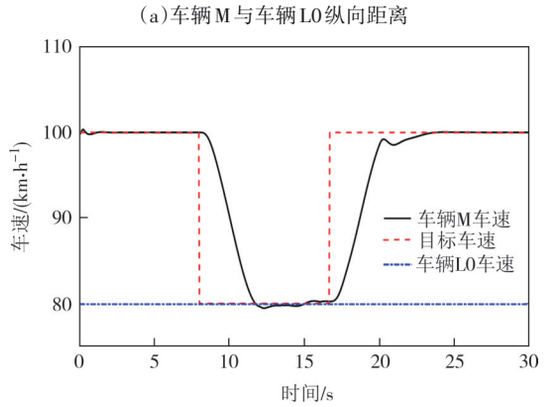
好的轨迹跟踪效果.从图9(c)和(d)中可以看出,3种车速下车辆的横摆角速度均在±0.06 rad/s的范围内,横向加速度均在±0.15g范围内,说明车辆在换道过程中具有较好的舒适性和平顺性.从图9(e)可以看出,在初始时刻会出现短暂的车速不稳定,但迅速收敛,车速整体基本跟踪平稳,在收敛后,3种车速下,最大车速误差绝对值分别为0.24 km/h、0.35 km/h、0.35 km/h,因此,车辆能够按照预期的车速行驶.综上所述,设计的横纵向控制器能实现安全精确的控制,满足换道的舒适性和安全性.

3.2.2　换道安全性不满足工况

本工况主要考虑在产生换道意图时,安全性不满足的情况下驾驶员不满意度的变化,同时关注产生换道意图时是否会出现消失或震荡,验证在跟踪换道轨迹时,遗传算法优化的有效性.设置车辆M的初始车速为100 km/h,车辆Fd车速为110 km/h,并保持匀速行驶,初始时刻和车辆M相距50 m;车辆L0车速为80 km/h,并保持匀速行驶,初始时刻和车辆M相距100 m,目标车道前车Ld车速为100 km/h,初始时刻和车辆M相距30 m. 不满意度阈值为55.2. 车辆纵向距离与车速仿真结果如图10所示.



(a)车辆M与车辆L0纵向距离



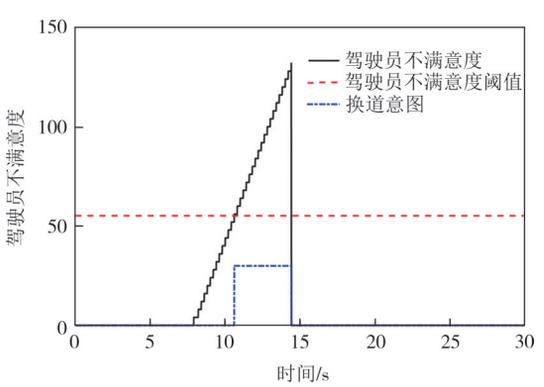
(b)车辆M与车辆L0车速

图10　车辆纵向距离与车速仿真结果

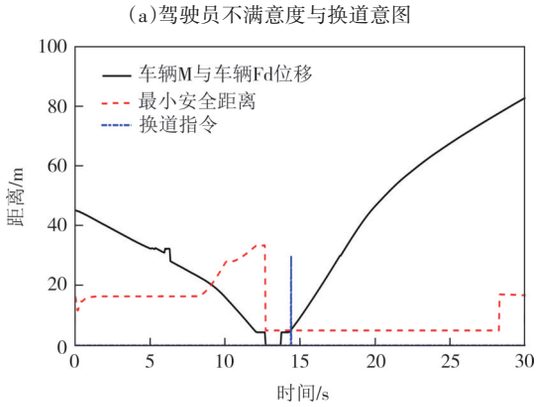
Fig.10　Vehicle longitudinal distance and speed simulation results

由图10可知,当车辆M速度为100 km/h,车辆L0速度为80 km/h时,最小安全距离为50.48 m,因此当车辆M跟车距离小于50.48 m时,车辆开始减速,同时驾驶员不满意度开始积累. 当不满意度积累到阈值时,产生换道意图(为了描述清晰,将换道指令和换道意图从1扩大至30),但车辆M和车辆Fd的距离小于最小安全距离,不满足换道的安全性,因此不能执行换道,此时要等待车辆Fd超过自车,并且距离要大于安全距离,才可执行换道.

车辆换道决策仿真结果如图11所示,由图11可知,在未执行换道之前,驾驶员不满意度一直积累,大于阈值之后,产生的换道意图一直存在.在15 s左右,两车的距离大于最小安全距离,满足换道条件,发出换道指令(为了描述清晰,将换道指令从1扩大至30)并执行换道,驾驶员不满意度清零,同时换道意图也消失,并在成功换道后,自车逐渐加速到目标车速100 km/h. 验证了提出的换道决策模型不仅可以正确产生换道意图,还可以保证换道过程的安全性.在驾驶员不满意度达到阈值而不满足换道安全性时,驾驶员不满意度没有提前清空或不增长,驾驶员的换道意图也没有出现消失或震荡的现象,满足换道决策的要求.



(a)驾驶员不满意度与换道意图

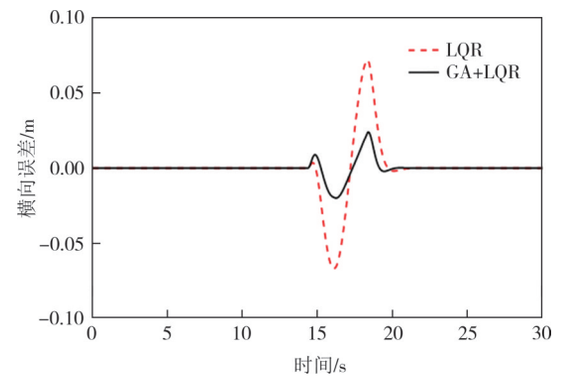


(b)换道可行性

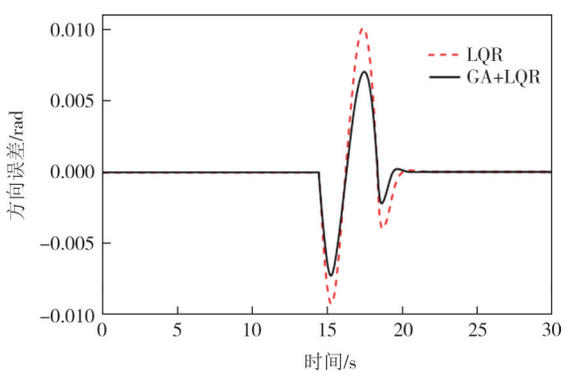
图11　车辆换道决策仿真结果

Fig.11　Vehicle lane change decision simulation results

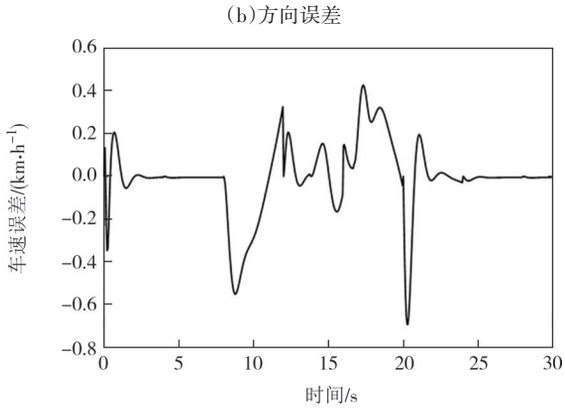
车辆轨迹跟踪仿真结果如图12所示,从图12可以看出,LQR控制器最大横向误差绝对值为0.072 m,误差较小,完全在可控范围内.LQR控制器最大方向误差绝对值为0.01 rad.



(a)横向误差



(b)方向误差



(c)车速误差

图12 车辆轨迹跟踪仿真结果

Fig.12 Vehicle track tracking simulation results

不同控制器误差对比如表2所示,由表2可知,LQR控制器和GA+LQR控制器最大横向误差绝对值分别为0.072 m和0.024 m,优化了66.7%,平均横向误差绝对值优化了71.9%;最大方向误差绝对值分别为0.010 0 rad和0.007 3 rad,优化了27%,平均方向误差绝对值优化了31.2%. 因此,GA+LQR控制器的轨迹跟踪效果更好.图12(c)显示,最大车速误差绝对值为0.69 km/h,车速误差较小,基本维持稳定车速,证实了纵向控制器的可靠性.

表2 不同控制器误差对比

Tab.2 Errors comparison of different controllers

控制器	最大横向误差绝对值/m	最大方向误差绝对值/rad	平均横向误差绝对值/m	平均方向误差绝对值/rad
LQR	0.072	0.010 0	0.006 4	0.000 93
GA+LQR	0.024	0.007 3	0.001 8	0.000 64

4 结论

1)本文针对自主车辆换道,建立了基于驾驶员不满意度的换道决策模型.建立了基于车辆的道路误差模型的横向LQR控制器,提出了用遗传算法离线优化LQR控制器的方法.由于本文采用的遗传算法优化LQR控制器为离线优化,虽然获得最优权重矩阵时需要等待遗传算法优化结果,但对控制器的实时性并无影响. 同时建立纵向LQR控制器控制车速.

2)仿真结果表明,车辆在车速分别为90 km/h、100 km/h、110 km/h工况下,最大横向误差绝对值分别为0.028 m、0.034 m、0.054 m,验证了横向LQR控制器的鲁棒性和可靠性. 3种车速下,最大车速误差绝对值分别为0.24 km/h、0.35 km/h、0.35 km/h,车辆能够按照预期的车速行驶. 在换道安全性不满足工况下,LQR控制器和GA+LQR控制器最大横向误差绝对值分别为0.072 m和0.024 m,优化了66.7%;平均横向误差绝对值优化了71.9%. LQR控制器和GA+LQR控制器最大方向误差绝对值分别为0.010 0 rad和0.007 3 rad,优化了27%;平均方向误差绝对值优化了31.2%. 优化后的横向LQR控制器在不同车速和工况下的换道均具有较小的跟踪误差,纵向LQR控制器可以稳定跟随期望车速,具有较小的速度误差.

3)本文建立的自主换道决策和控制模型可以较好地实现换道行为,未来拟在建立考虑不同驾驶人员风格的换道决策模型基础上,进一步提升换道控制精度.

参考文献

[1] AMMOUN S, NASHASHIBI F, LAURGEAU C. An analysis of the lane changing manoeuvre on roads: the contribution of inter-

vehicle cooperation via communication[C]//2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2007. Istanbul, Turkey: IEEE,2007:1095-1100.

[2] GIPPS P G. A model for the structure of lane-changing decisions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1986, 20(5): 403-414.

[3] RATROUT N T, Rahman S M. A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2009, 34: 121-133.

[4] SEO J, YI K. Robust mode predictive control for lane change of automated driving vehicles [R]. Warrendale: SAE Technical Paper, 2015.

[5] CHEN Y Y, LI G F, LI S, et al. Exploring behavioral patterns of lane change maneuvers for human-like autonomous driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 14322-14335.

[6] TALEBPOUR A, MAHMASSANI H S, HAMDAR S H. Modeling lane-changing behavior in a connected environment: a game theory approach[J]. Transportation Research Procedia, 2015, 7: 420-440.

[7] WANG X, FAN J H, LIU N. A novel decision-making algorithm of autonomous vehicle based on improved SVM[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Aviation Safety and Information Technology, October 14-16, 2020. Weihai, China: ACM,2020:643-648.

[8] 李斌.汽车快速行驶换道场景分析与决策方法研究[D].长春:吉林大学, 2020.
LI B. Research on the scenario analysis and decision-making method of the lane change during fast driving[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)

[9] 陈慧,王洁新. 基于驾驶人不满度的高速公路自动驾驶换道决策[J].中国公路学报,2019, 32(12): 1-9.
CHEN H, WANG J X. A decision-making method for lane changes of automated vehicles on freeways based on drivers' dissatisfaction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(12):1-9.(in Chinese)

[10] KUSUMA D H, ALI M, SUTANTRA N. The comparison of optimization for active steering control on vehicle using PID controller based on artificial intelligence techniques [C]//2016 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (ISemantic), August 5-6, 2016. Semarang, Indonesia: IEEE, 2016: 18-22.

[11] SAEEDI M A. A new robust combined control system for improving manoeuvrability, lateral stability and rollover prevention of a vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2020, 234(1): 198-213.

[12] 李玉治, 李刚, 张志华.极限工况下无人驾驶四轮转向汽车横向跟踪控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(1): 66-74.
LI Y Z, LI G, ZHANG Z H. Lateral tracking control of a driverless four-wheel steering vehicle under extreme conditions[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(1):66-74. (in Chinese)

[13] YANG T, BAI Z W, LI Z Q, et al. Intelligent vehicle lateral control method based on feedforward+ predictive LQR algorithm [J]. Actuators, 2021, 10(9): 228.

[14] 段敏,孙小松,张博涵. 基于模型预测控制与离散线性二次型调节器的智能车横纵解耦跟踪控制[J]. 汽车技术,2022(8): 38-46.
DUAN M, SUN X S, ZHANG B H. Horizontal and vertical decoupling tracking control based on MPC and DLQR [J]. Automobile Technology, 2022(8):38-46.(in Chinese)

[15] 高琳琳, 唐风敏, 郭蓬, 等. 自动驾驶横向运动控制的改进LQR方法研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 435-441.
GAO L L, TANG F M, GUO P, et al. Research on improved LQR control for self-driving vehicle lateral motion [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(3): 435-441.(in Chinese)

[16] SEILER P, SONG B, HEDRICK J K. Development of a collision avoidance system[J]. Neurosurgery, 1998, 46(2): 492.

[17] PHAN T T, LE L B, NGODUY D. A cooperative space distribution method for autonomous vehicles at a lane-drop bottleneck on multi-lane freeways [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(4): 3710-3723.

[18] SUN B H, DENG W W, WU J, et al. Research on the classification and identification of driver's driving style[C]//2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), December 9-10, 2017. Hangzhou, China: IEEE, 2017: 28-32.

[19] 刘玉雯.高速公路换道风险判别与个性化预警研究[D].西安:长安大学, 2020: 10-26.
LIU Y W. Research on lane-changing risk discrimination and personalized forewarning of expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020:10-26. (in Chinese)

[20] PIZARRO-LERMA A O, GARCÍA-HERNÁNDEZ R, SANTIBÁÑEZ V A. Fine-tuning of a fuzzy computed-torque control for a 2-DOF robot via genetic algorithms [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(13): 326-331.

[21] 郭景华, 胡平, 李琳辉, 等.基于遗传优化的无人车横向模糊控制[J].机械工程学报, 2012, 48(6): 76-82.
GUO J H, HU P, LI L H, et al. Study on lateral fuzzy control of unmanned vehicles via genetic algorithms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 76-82.(in Chinese)

[22] MARADA T, MATOUSEK R, ZUTH D. Design of linear quadratic regulator (LQR) based on genetic algorithm for inverted pendulum[J]. MENDEL Soft Computing Journal, 2017, 23(1): 149-156.

[23] SHIRAHATTI A, PRASAD P S S, PANZADE P, et al. Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2008, 30(1):66-76.