

基于生态驾驶的自动驾驶汽车交叉路口控制策略研究*

赵树恩 王盛

(重庆交通大学, 重庆 400074)

【摘要】为了进一步提高自动驾驶汽车在交叉路口行驶时的燃油经济性,基于模型预测控制(MPC)理论,量化分析了车辆安全性、经济性、舒适性等多性能指标函数及约束,并设计了以经济性为主的交叉路口自动驾驶汽车生态驾驶控制器。仿真结果表明,所提出的控制策略能够保证良好的安全性和舒适性,与LQR控制器相比,在有前车影响和无前车影响工况下的百公里油耗分别降低15.83%和34.98%。

关键词: 交叉路口 生态驾驶 自动驾驶 模型预测控制

中图分类号: U461.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230557

Research on Ecological Driving Control Strategy of Autonomous Vehicle at Intersections

Zhao Shuen, Wang Sheng

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

【Abstract】In order to further improve the fuel economy of autonomous vehicle driving at intersections, this paper analyzed quantitatively the performance index functions and constraints including vehicle safety, economy, comfort, etc., based on the Model Predictive Control (MPC) theory, and an ecological driving controller of autonomous vehicle at intersections was designed. The simulation results show that the control strategy proposed in the paper can ensure good safety and comfort, reduce fuel consumption by 15.83% and 34.98% respectively compared with Linear Quadratic Regulator (LQR) under conditions with/without vehicle ahead affecting vehicle driving.

Key words: Intersections, Ecological driving, Autonomous driving, Model Predictive Control (MPC)

【引用格式】赵树恩,王盛.基于生态驾驶的自动驾驶汽车交叉路口控制策略研究[J].汽车技术,2024(3):17-23.

ZHAO S E, WANG S. Research on Ecological Driving Control Strategy of Autonomous Vehicle at Intersections[J]. Automobile Technology, 2024(3): 17-23.

1 前言

交叉路口是道路交通路网系统中的重要节点,既可组成和分离多路交通,也是交通拥堵、高油耗、高排放和行车事故多发的区域。交叉路口的交通参与者及道路环境复杂多样,据交通管理部门统计,交叉路口及其附近区域的事故发生率约占城市交通事故数量的60%,占交通事故总数量的30%左右。同时,在城市交叉路口发生车辆碰撞事故时,约80%的驾驶员无法采取任何回避措施^[1]。此外,为避免与前车发生碰撞,驾驶员经常频繁地操纵车辆起停或加减速变换,这不仅降低了乘坐舒适

性,还加剧了能源消耗和环境污染。生态驾驶和自动驾驶技术的发展成为解决这些问题的重要途径。

为提高车辆在交叉路口的经济性,Homahaudhuri等^[2]采用匀速车辆模型求解通过交叉路口的生态车速,建立匀加速-匀速车辆模型,求解出车辆通过交叉路口的最优车速,优化生态驾驶控制模型。Kamalanathsharma等^[3]提出三角函数加速度模型,车辆在执行加速和减速操作时,分别根据三角函数曲线选取相应的加速度,根据车辆瞬时速度引导车辆不停车通过路口。刘焕峰^[4]量化分析了经济巡航的性能指标和约束条件,利用模糊逻辑算法实时调整权重,基于模型预测控制(Model Predictive

*基金项目:国家自然科学基金项目(52072054);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2021jsex-cylhX0006);

汽车主动安全测试技术重庆市工业和信息化重点实验室开放课题(2021KFKT01)。

通信作者:赵树恩(1972—),男,教授,博士,主要研究方向为智能汽车与自动驾驶,zse0916@163.com。

Control, MPC)理论框架设计了汽车经济巡航控制系统。Ye等^[5]考虑跟车时速度变化对车辆驾驶的影响,利用径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network, RBF-NN)模型设计了改进的生态驾驶控制算法。

现有文献大多采用基于规则的控制方法,采用预定规则计算车辆通过一个或者多个交叉路口、避免停车的建议车速,但未同时考虑前方车辆的影响。为此,本文兼顾安全性、经济性、舒适性等多性能指标,提出了一种自动驾驶汽车生态驾驶控制模型,以实现交叉路口的生态驾驶。

2 生态驾驶控制架构

生态驾驶控制主要是在满足一系列物理约束的条件下优化控制策略,使自动驾驶汽车跟踪期望速度轨迹或者前方车辆。为保证自动驾驶汽车准确跟踪目标速度,本文通过对车辆状态反馈与期望纵向速度、轨迹信息进行误差处理,得到主车的纵向位移误差 Δd 、速度误差 Δv ,以 $[\Delta d, \Delta v, a_s]$ 作为控制器输入(其中 a_s 为主车实际加速度)、加速度 a_t 作为扰动,提出以经济性为主,兼顾安全性和舒适性的多目标控制策略,并对各性能指标进行量化分析,利用MPC求解出最优加速度控制量 a_c ,通过驱动、制动切换逻辑确定车辆驱动或制动,并通过车辆逆纵向动力学模型得到加速踏板开度 α 和制动油缸压力 p_{des} ,实现生态驾驶控制。交叉路口自动驾驶汽车生态驾驶控制架构如图1所示。

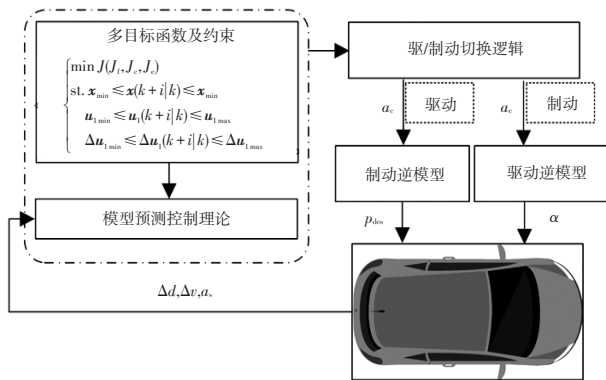


图1 自动驾驶汽车生态控制架构

3 多目标函数设计及约束条件分析

3.1 车辆运动学分析

在城市交叉路口场景下,交叉路口信号规划的作用主要是合理分配路权、保证交叉路口机动车流的有序运行^[6-7]。同时,交叉路口的交通参与者复杂,为降低事故发生概率,通常设有限速限行、方向引导等标志。在行

车过程中,根据交通法规要求,驾驶员在做出决策时要考虑道路实时状况,影响驾驶员决策的因素主要分为4个方面,即驾驶员因素、车辆因素、道路因素、环境因素^[8-9]。在自动驾驶汽车的行为决策模块输出最优速度轨迹后,如果车辆不跟随前车行驶,则以决策模块给出的最优速度序列作为期望输入,以进行生态驾驶控制。若前方有车辆并且行为决策模块输出了跟随前车的行驶策略,自动驾驶汽车将进行生态巡航控制^[10-13]。

如图2a所示,无前车时,车辆速度跟踪控制单元会通过制动、驱动系统协调动作,使车辆以期望速度行驶。根据运动学关系,将位移误差 Δd 定义为实际纵向位移 d_t 与期望纵向位移 d_r 的差值,速度误差 Δv 定义为期望速度 v_r 与实际行驶速度 v_t 的差值,则有:

$$\begin{cases} \Delta d = d_t - d_r \\ \Delta v = v_r - v_t \end{cases} \quad (1)$$

如果车辆跟随前车行驶,则期望车速 v_r 为前车行驶速度,如图2b所示,为保证行车安全,定义 d_s 为车间实际相对距离、 d_h 为纵向期望安全距离。采用固定车间距策略,纵向安全距离是跟车过程中防止车辆碰撞的关键因素之一,表示为:

$$d_h = v_s t_h + d_0 \quad (2)$$

式中: $d_0=1\sim 3$ m为两车静止时的最小距离; v_s 为主车车速; t_h 为车间时距,取值为1.0~2.5 s。

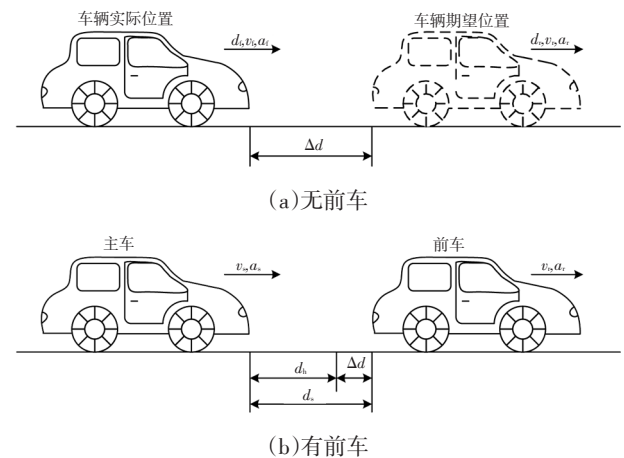


图2 车辆运动学关系

考虑到执行机构动作会使实际加速度响应滞后,采用一阶惯性延迟表示主车实际加速度 a_s 与期望加速度 a_c 之间的传递函数关系:

$$a_s = \frac{K_1}{T_s + 1} a_c \quad (3)$$

式中: K_1 为系统增益, T 为时间延迟。

选择系统状态变量为 $x=[\Delta d \ \Delta v \ a_s]^T$ 、控制变量为 $u_1=[a_c]$,将前车加速度 a_r 作为干扰变量 $u_2=[a_r]$,其状态空

间模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}_1 + \mathbf{D}\mathbf{u}_2 \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -t_h \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1/T \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_1/T \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = [0 \ 1 \ 0]^T.$$

3.2 多目标性能优化分析

本文综合考虑车辆安全性、经济性、舒适性指标函数及约束,设计以经济性为主的交叉路口自动驾驶汽车生态驾驶控制器。

3.2.1 经济性指标

最小化燃油消耗是生态驾驶的主要目的,车辆在跟车行驶过程中,燃油消耗与纵向加速度密切相关。降低加速度和加速度变化率,减少急加速和紧急制动情形,可有效提高车辆的燃油经济性。因此,在跟车过程中,可通过优化巡航车辆的加速度及其变化率来提升燃油经济性。经济性指标 J_e ^[14-15]及其约束可表示为:

$$J_e = \omega_a a_c^2 + \omega_{da} \dot{a}_c^2 \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_{\min} \leq a_c \leq a_{\max} \\ \dot{a}_{\min} \leq \dot{a}_c \leq \dot{a}_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_a 为期望加速度权重, ω_{da} 为期望加速度变化率权重, a_{\min} 、 \dot{a}_{\min} 分别为期望加速度和期望加速度变化率的下限, a_{\max} 、 \dot{a}_{\max} 为期望加速度和期望加速度变化率的上限。

3.2.2 安全性指标

行车安全是跟车过程的首要目标。安全距离模型的期望值是跟车行驶的最终控制目标,为了保障整个行车过程的安全性,需采用安全距离对实际车间距进行约束,时刻避免与前车追尾碰撞,即保证跟车距离 d 不小于最小安全距离 d_{\min} ,速度小于道路限速,则有:

$$\begin{cases} d \geq d_{\min} \\ 0 \leq v_s \leq v_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_{\max} 为最大安全车速。

3.2.3 跟踪性指标

在车辆跟车行驶时,控制系统的最终目的是两车之间的实际距离趋近于期望安全距离,即 $\Delta d \rightarrow 0$,主车速度尽量接近前车,即 $\Delta v \rightarrow 0$,这时两车处于相对稳定状态;在速度轨迹跟踪时,其纵向位移误差和速度误差也应趋近于0。因此,跟踪性能指标 J_t 及约束表示为:

$$J_t = \omega_d \Delta d^2 + \omega_v \Delta v^2 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta d_{\min} \leq \Delta d \leq \Delta d_{\max} \\ \Delta v_{\min} \leq \Delta v \leq \Delta v_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_d 为距离误差的权重, ω_v 为速度误差的权重, Δd_{\min} 、 Δv_{\min} 分别为距离误差和速度误差的下限, Δd_{\max} 、 Δv_{\max} 分别为距离误差和速度误差的上限。

3.2.4 舒适性指标

为保证车辆行驶过程中的舒适性,应尽量避免频繁加减速,舒适性指标 J_c ^[4]及约束表示为:

$$J_c = \omega_s a_s^2 \quad (10)$$

$$a_{\min} \leq a_s \leq a_{\max} \quad (11)$$

式中: ω_s 为车辆纵向加速度的权重。

综上所述,车辆速度跟踪和巡航过程中的多性能目标优化函数为:

$$J = J_c + J_t + J_e = \omega_a a_c^2 + \omega_{da} \dot{a}_c^2 + \omega_d \Delta x^2 + \omega_v \Delta v^2 + \omega_s a_s^2 \quad (12)$$

式(12)可以表示为:

$$J = J_c + J_t + J_e = \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \omega_a u_1^2 + \omega_{da} \dot{u}_1^2 \quad (13)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \omega_d & 0 & 0 \\ 0 & \omega_v & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s \end{bmatrix}.$$

4 模型预测控制器设计

模型预测控制的基本原理是根据当前时刻的系统状态信息,对未来的系统变量进行预测,然后根据预测结果建立在预测时域内的优化问题,并采用数值计算方法对所建立的问题进行求解^[6]。

首先,设离散步长为 T_s ,离散化状态方程,则有:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}^* \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}^* \mathbf{u}_1(k) + \mathbf{D}^* \mathbf{u}_2(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k+1) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{A}^* = e^{\mathbf{A}T_s}$, $\mathbf{B}^* = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}\tau} \mathbf{B} d\tau$, $\mathbf{D}^* = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}\tau} \mathbf{D} d\tau$, τ 为积分时间常数。

设模型预测控制的预测时域为 p 、控制时域为 q ,由预测控制理论推导出系统在预测时域内的 p 步预测模型为:

$$\mathbf{Y}_p(k+1|k) = \mathbf{S}_y \Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{I} \mathbf{y}(k) + \mathbf{S}_u \Delta \mathbf{u}_2(k) + \mathbf{S}_u \Delta \mathbf{U}(k) \quad (15)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Y}_p(k+1|k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(k+1) \\ \mathbf{y}(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+p) \end{bmatrix} \text{ 为 } p \text{ 步预测输出, } \Delta \mathbf{x}(k)、$$

$\Delta \mathbf{u}_1(k)$ 、 $\Delta \mathbf{u}_2(k)$ 分别为状态增量、控制增量、干扰增量,

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k-1) \\ \Delta \mathbf{u}_1(k) = \mathbf{u}_1(k) - \mathbf{u}_1(k-1) \\ \Delta \mathbf{u}_2(k) = \mathbf{u}_2(k) - \mathbf{u}_2(k-1) \end{cases}, \Delta \mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_1(k) \\ \Delta \mathbf{u}_1(k+1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}_1(k+q-1) \end{bmatrix},$$

$$S_x = \begin{bmatrix} CA^* \\ \sum_{i=1}^2 CA^{*i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^{*i} \end{bmatrix}_p, I = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} \\ \vdots \\ I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{p \times 1}, S_\omega = \begin{bmatrix} CD^* \\ \sum_{i=1}^2 CA^{*i-1} D^* \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^{*i-1} D^* \end{bmatrix}_{p \times 1},$$

$$S_u = \begin{bmatrix} CB^* & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \sum_{i=1}^2 CA^{*i-1} B^* & CB^* & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^q CA^{*i-1} B^* & \sum_{i=1}^{q-1} CA^{*i-1} B^* & \cdots & \cdots & CB^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^{*i-1} B^* & \sum_{i=1}^{p-1} CA^{*i-1} B^* & \cdots & \cdots & \sum_{i=1}^{p-q+1} CA^{*i-1} B^* \end{bmatrix}_{(p+q) \times (p+q)} \circ$$

根据式(13),基于k时刻的信息,对(k+i)时刻的系统状态和输入进行预测,建立预测时域内的多目标函数及约束:

$$J^* = \sum_{i=1}^p \left[Q \left\| x(k+i|k) \right\|^2 + \omega_a \left\| u_1(k+i|k) \right\|^2 + \omega_{da} \left\| \Delta u_1(k+i|k) \right\|^2 \right] \quad (16)$$

(k+i)时刻的约束预测模型为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta d_{\min} \\ \Delta v_{\min} \\ a_{\min} \end{bmatrix} \leq x(k+i|k) = \begin{bmatrix} \Delta d(k+i|k) \\ \Delta v(k+i|k) \\ a_s(k+i|k) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta d_{\max} \\ \Delta v_{\max} \\ a_{\max} \end{bmatrix} \\ a_{\min} \leq u_1(k+i|k) \leq a_{\max} \\ \dot{a}_{\min} T_s \leq \Delta u_1(k+i|k) \leq \dot{a}_{\max} T_s \end{cases} \quad (17)$$

综上,车辆跟踪过程中预测时域内兼顾经济性、安全性、跟踪性和舒适性的优化问题可表述为:

$$\begin{cases} \min J = J_f + J_c + J_e \\ \text{s.t. } x_{\min} \leq x(k+i|k) \leq x_{\max} \\ u_{1\min} \leq u_1(k+i|k) \leq u_{1\max} \\ \Delta u_{1\min} \leq \Delta u_1(k+i|k) \leq \Delta u_{1\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: x_{\min} 、 x_{\max} 为由多目标分析得到的状态约束, $\Delta u_{1\min}$ 、 $\Delta u_{1\max}$ 为预测时域内控制增量的约束值, $u_{1\min}$ 、 $u_{1\max}$ 为预测时域内控制量的约束值。

5 逆纵向动力学模型

5.1 驱动、制动切换逻辑

驱动机构和制动机构均不工作时,车辆的减速度定义为滑行减速度 a 。由于空气阻力的存在,滑行减速度会受到车速的影响而发生变化。为确定驱动和制动的逻辑切换曲线,以平稳干燥路面下不同速度的最大滑行减速度为基础,当牵引力矩和制动压力均为0时,建立查询表。采用简单的逻辑判断,即如果滑行减速度与期望加

速度的差值小于零,则驱动,否则制动。为提高乘坐舒适性,设置过渡阈值 $\Delta h=0.02 \text{ m/s}^2$ 。切换逻辑如表1所示。

表1 驱动、制动切换逻辑

判断条件	判断结果
$a_s < a - \Delta h$	制动
$a_s > a + \Delta h$	驱动
$a - \Delta h \leq a_s \leq a + \Delta h$	保持不变

5.2 驱动逆模型

当驱动、制动切换逻辑输出为驱动时,根据MPC控制器求解的最优加速度计算出发动机期望输出转矩,并通过发动机MAP图得到加速踏板开度控制量。

忽略坡度阻力,发动机转矩 T_e 与加速度的关系可以表示为:

$$T_e = \frac{\left(ma_c r + \frac{1}{21.15} C_D A v^2 r + mgfr \right)}{i_0 \eta} \quad (19)$$

式中: m 为整车质量, r 为轮胎半径, C_D 为空气阻力系数, A 为迎风面积, v 为行驶加速度, g 为重力加速度, f 为路面摩擦因数, i_0 为主减速器传动比, η 为动力传递效率。

发动机转速与实时车速之间的关系为:

$$n_e = \frac{v i_g i_0}{2\pi r} \quad (20)$$

式中: i_g 为变速器传动比。

发动机转矩、转速与加速踏板开度的三维MAP图如图3所示。根据某一时刻的转速 n_e 和转矩 T_e 即可获得加速踏板开度 α ,然后输入到车辆模型中,实现对车速的控制。

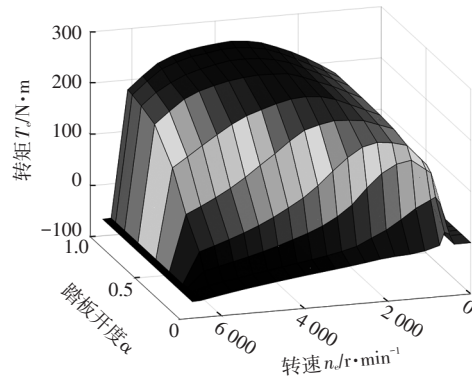


图3 发动机MAP图

5.3 制动逆模型

当驱动、制动切换策略判断为制动时,车辆在减速过程中期望制动压力表示为:

$$p_{des} = T_b / K \quad (21)$$

式中: K 为比例制动系数, T_b 为期望制动力矩。

期望制动力矩的计算公式为:

$$T_b = -\left(ma_{cd} + mgf + \frac{1}{21.15}C_DAv^2\right)r \quad (22)$$

6 仿真验证

为验证自动驾驶汽车生态控制模型的有效性,利用CarSim和Simulink仿真平台,将本文设计的MPC算法与仅考虑跟踪性的线性二次型最优控制(Linear Quadratic Regulator, LQR)算法进行对比。仿真分为无前车和有前车两种情况。

6.1 无前车影响情况

无前车影响时,设车辆初速度为42.5 km/h,初始时刻位置与交叉口停止线的距离为167 m,此时交叉口信号灯灯态为绿灯,绿灯剩余时间为23 s,已知自动驾驶汽车行为决策模块的输出如图4所示,其中决策结果的0和1分别表示不通过和通过,自动驾驶汽车按期望速度行驶可以通过交叉路口。

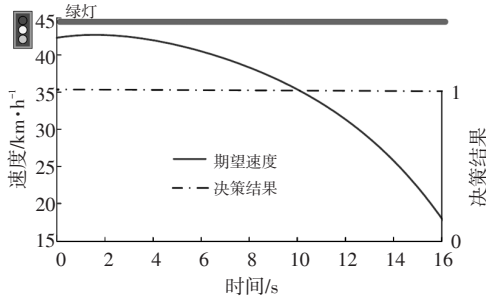


图4 自动驾驶行为决策结果

图5、表2展示了LQR与MPC生态驾驶控制的对比结果。从图5a中可以看出,在车辆以初速度42.5 km/h进入交叉路口,绿灯剩余时间为23 s的情况下,LQR和生态驾驶控制器都能使车辆在第16.3 s通过交叉路口,确保了行车安全。图5b、图5c中,LQR和生态驾驶控制器的速度都能很好地跟踪期望速度,加速度曲线变化趋势相似,但生态驾驶加速度曲线更为平滑,乘坐舒适性更好。图5d中瞬时燃油消耗曲线与横、纵坐标轴围成的面积即为行驶总油耗,进而可计算得到百公里油耗,结合图5d和表2可以看出,采用MPC生态驾驶控制时的百公里油耗较采用LQR控制器时降低了15.83%。这是因为生态驾驶控制器使得车辆的加速度和速度变化更平缓,加减速频率更低,从而降低了车辆的油耗。因此,采用生态驾驶控制策略能够有效减少燃油消耗,有利于实现生态驾驶。

6.2 有前车影响情况

设自动驾驶汽车跟随前车进入交叉路口区域,两车速度均为30 km/h,车间距10.33 m,此时前方交叉路口信号灯状态为绿色,剩余时间15 s,红灯周期为25 s,主车与路口停止线距离为235 m。设置前车的行驶速度

如图6所示,前4 s加速行驶,然后匀速行驶6 s,第10 s开始减速行驶,最后在30 s时进入怠速状态。

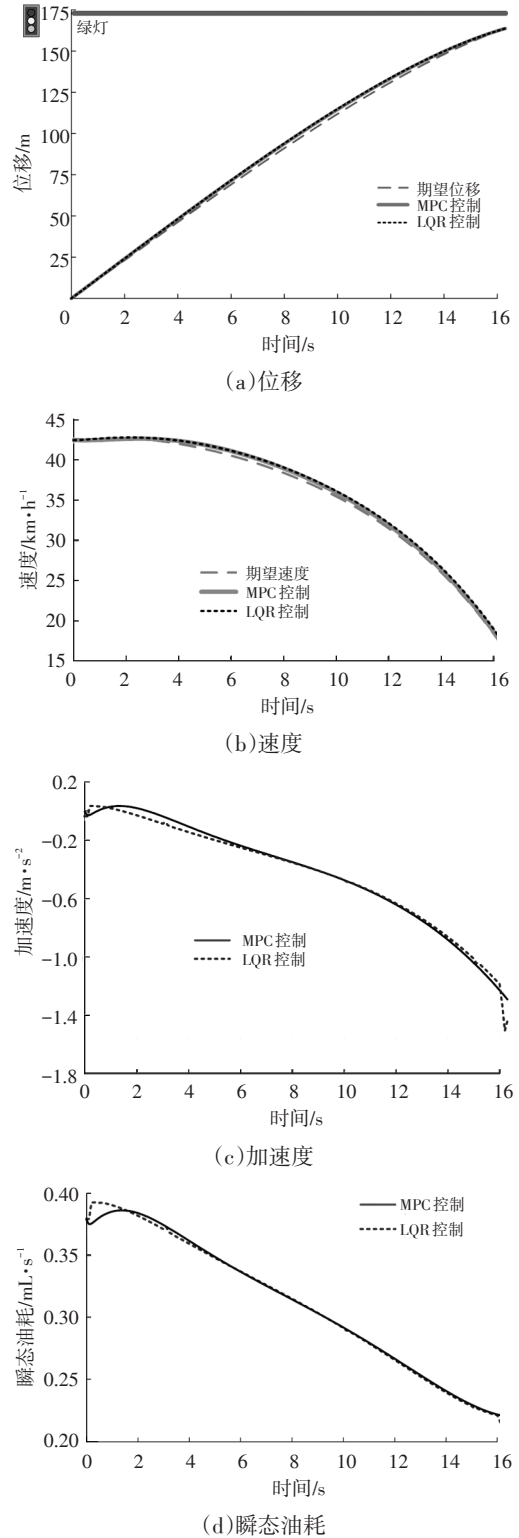


图5 无前车影响的交叉路口生态驾驶控制

表2 无前车影响时LQR与MPC生态驾驶控制器结果对比

控制器	位移误差/m	速度误差/m·s ⁻¹	百公里油耗/L
LQR	0.339 2	0.351 7	4.23
MPC	0.348 5	0.389 1	3.56

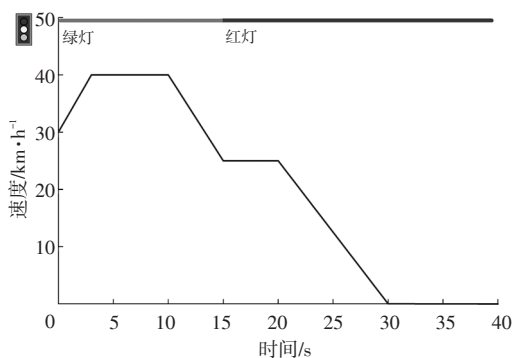
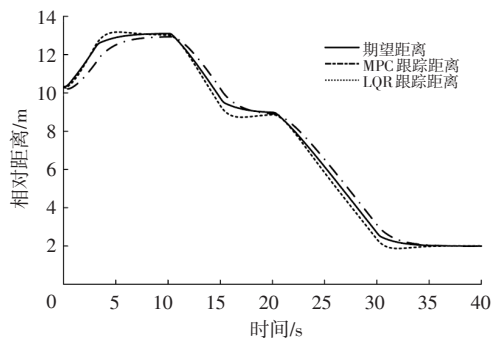
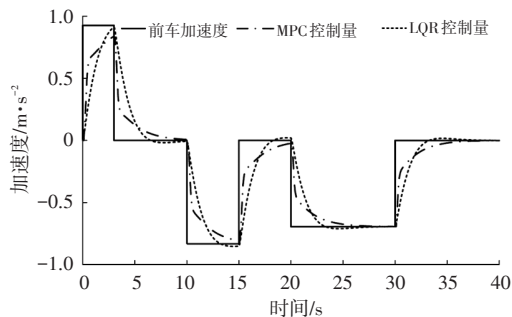


图6 前车行驶速度

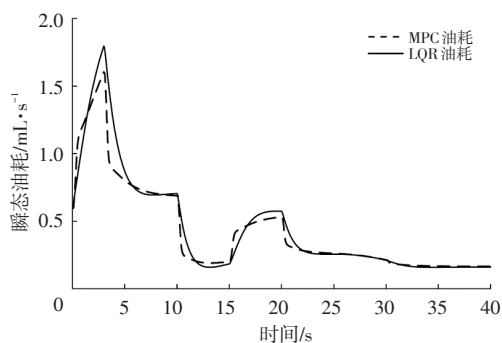
根据前车情况,LQR和MPC生态驾驶控制器的作用结果如图7和表3所示。从图7a、图7b中可以看出,整个时间范围内,模型的输出一直为跟驰车辆跟随前车行驶,主车跟随前车在交叉路口停止线前急速。结合图7c、图7d和表3可以发现,在MPC和LQR控制器的作用下,自动驾驶汽车的速度跟随曲线和跟车间距曲线基本重合,车辆加速度可以在快速跟踪前车加速度的同时随着前车加速度减小而逐渐减小,最后跟随前车停车等待,不会与前车发生碰撞,具有良好的安全性。在整个跟车过程中,加速度在 $[-1,1]$ m/s^2 范围内变化,舒适性较好。跟车距离的均方根误差小于0.3 m,跟车速度的均方根误差约为0.5 km/h,速度跟随和车间距跟随的总体偏差较小,车间距始终接近期望车间距。这表明车辆整体控制良好,系统功能实现良好,具备较好的安全性能。在相同仿真时间下,MPC和LQR的控制精度相差不大。结合图7e和表3可以看出,在相同时间内,MPC生态驾驶控制器的百公里油耗较LQR降低了34.98%,这有利于实现跟车过程中的生态驾驶。



(c)相对距离



(d)加速度

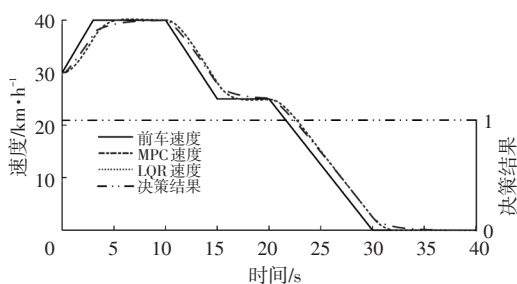


(e)瞬态油耗

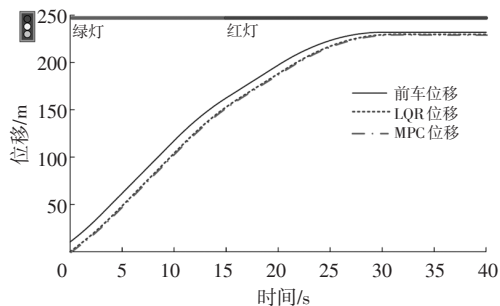
图7 有前车影响的交叉路口生态驾驶控制

表3 有前车影响下的MPC与LQR控制结果对比

控制器	距离误差/m	速度误差/ $m \cdot s^{-1}$	百公里油耗/L
LQR	0.225 1	0.437 5	6.93
MPC	0.234 1	0.501 9	4.51



(a)速度



(b)位移

7 结束语

本文主要针对交叉路口的自动驾驶汽车生态控制策略开展了研究。车辆跟随前车行驶时,生态驾驶控制采用经济性巡航控制策略;不跟随前车时,生态驾驶控制采用最优速度跟踪控制策略。基于此,提出了考虑安全性、经济性和舒适性的多目标控制策略,建立基于MPC的自动驾驶汽车生态驾驶控制器,并应用CarSim/Simulink进行联合仿真,将生态驾驶控制器与LQR控制器的控制效果进行了对比。仿真结果表明,匀速通行策

略油耗较普通驾驶策略低,但生态驾驶策略的燃油经济性更好:在交叉路口无前车时,生态驾驶控制器能很好地跟踪期望速度,加速度曲线变化更为平滑,降低了车辆的油耗,同时提高了行车舒适性;当交叉路口有前车时,生态驾驶控制器输出一直为跟驰车辆跟随前车行驶,且在整个跟车过程中,加速度变化幅度和跟车距离的均方根误差较小,保证了车辆舒适性和行车安全性,并且生态驾驶控制器的百公里油耗相比于LQR控制明显降低,这有利于实现车辆在交叉路口的生态驾驶。

参 考 文 献

- [1] HAN I. Scenario Establishment and Characteristic Analysis of Intersection Collision Accidents for Advanced Driver Assistance Systems[J]. Traffic Injury Prevention, 2020, 21(6): 354-358.
- [2] HOMCHAUDHURI B, VAHIDI A, PISU P. A Fuel Economic Model Predictive Control Strategy for a Group of Connected Vehicles in Urban Roads[C]// 2015 American Control Conference (ACC). Chicago, IL, USA: IEEE, 2015: 2741-2746.
- [3] KAMALANATHSHARMA R K, RAKHA H A, et al. Multi-Stage Dynamic Programming Algorithm for Eco-Speed Control at Traffic Signalized Intersections[C]// 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). The Hague, Netherlands: IEEE, 2013.
- [4] 刘焕峰. 基于TPFM和MPC的汽车经济型巡航控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
LIU H F. Research on Vehicle Economic Cruise Control Method Based on Transient Polynomial Fuel Consumption Model and Model Predictive Control[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [5] YE F, HAO P, QI X W, et al. Prediction-Based Eco-Approach and Departure at Signalized Intersections with Speed Forecasting on Preceding Vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1378-1389.
- [6] 龙岩松, 徐进, 潘存书, 等. 基于实车驾驶数据的信号交叉路口车辆运行特性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13567-13573.
LONG Y S, XU J, PAN C S, et al. Vehicle Operating Characteristics at Signalized Intersections Based on Field Driving Data[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13567-13573.
- [7] 王斌. 智能汽车避障风险评估及轨迹规划[J]. 汽车技术, 2018(6): 32-37.
WANG B. Obstacle Avoidance Threat Assessment and Trajectory Planning of Intelligent Vehicle[J]. Automobile Technology, 2018(6): 32-37.
- [8] 吴官朴, 杨昱, 赵阳, 等. 生态驾驶在智能网联汽车中的应用综述[J]. 汽车文摘, 2020(7): 9-16.
WU G P, YANG Y, ZHAO Y, et al. Application of Ecological Driving in Intelligent Networked Vehicles[J]. Automotive Digest, 2020(7): 9-16.
- [9] LENA R, GERALD S, CHRISTIAN M, et al. Driving Behavior at Traffic Light Intersections[J]. Cognition, Technology & Work, 17(4): 593-605.
- [10] 洪经纬. 基于前车速度预测的信号交叉路口汽车生态驾驶控制策略研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
HONG J W. Research on Vehicle Eco-Driving Control Strategy Based on Prediction of Vehicle Speed at Signalized Intersections[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021.
- [11] 李佳丽. 考虑燃油消耗量的自动驾驶汽车交叉路口生态驾驶行为决策研究[J]. 汽车工程师, 2023(8): 10-20.
LI J L. Research on Eco-Driving Behavior Decision-Making for Fuel Efficient Autonomous Vehicles at Intersections[J]. Automotive Engineer, 2023(8): 10-20.
- [12] 辛喆, 余舟, 郭强强, 等. 多交叉路口工况的网联汽车最优节油驾驶策略[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(7): 684-692.
XIN Z, YU Z, GUO Q Q, et al. Fuel-Saving Driving Strategy for Connected Vehicles in Multiple Signalized Intersections[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(7): 684-692.
- [13] 孟竹, 邱志军. 节能导向的信号交叉口生态驾驶策略研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(2): 76-84+92.
MENG Z, QIU Z J. A Study of Eco-Driving Strategy at Signalized Intersections[J]. Traffic Information and Safety, 2018, 36(2): 76-84+92.
- [14] TSUGAWA S. An Overview on Energy Conservation in Automobile Traffic and Transportation with ITS[C]// Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference. Tottori, Japan: IEEE, 2001: 137-142.
- [15] YI K, KWON Y D. Vehicle-to-Vehicle Distance and Speed Control Using an Electronic-Vacuum Booster[J]. JSAE Review, 2001, 22(4): 403-412.
- [16] 冷姚. 基于多性能目标协同优化的智能车辆轨迹规划与跟踪控制[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
LENG Y. Intelligent Vehicle Trajectory Planning and Tracking Control with Multi-Performance Object Collaborative Optimization[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2023年10月11日。