

基于模型预测控制的可变目标距离 自适应巡航控制研究

赵亚男¹, 王泰翔¹, 高利¹, 孙海鑫², 王显才¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 艺术与设计学院, 北京 100081)

摘要: 为解决在复杂交通环境中自适应巡航系统存在旁车切入本车前方工况时, 目标期望距离计算模型得到的期望相对距离与实际相对距离发生阶跃以及堵车蠕行工况, 车辆与前车距离较近, 拥堵路况不断启停的目标车辆的速度、加速度和相对距离持续抖动, 导致的纵向加速度幅值过大带来的驾驶平顺性、舒适性和安全性问题, 提出可变目标距离的自适应巡航控制算法, 基于模型预测控制理论, 建立离散纵向运动学预测模型, 综合考虑底盘加速度响应、极限安全纵向跟车距离、车辆自身物理限制、驾驶人乘坐舒适性等优化控制目标, 引入松弛因子进行在线求得可行解。在旁车不同切入工况、综合工况行驶以及堵车蠕行工况对本算法进行仿真和实车测试并利用数据对 IDM 算法开环实验, 研究成果对比表明, 考虑旁车切入的可变目标距离的自适应巡航控制算法在旁车加速切入工况中, 纵向控制产生的最大冲击度为 -0.25 m/s^3 , 相比于 IDM 模型降低 50%, 堵车蠕行工况中纵向控制产生最大减速度为 -0.3 m/s^2 , 相比于 IDM 模型降低 30%, 综合工况和定速巡航工况中, 算法在保持安全距离情况下可以对车辆实现稳定纵向控制, 加速度幅值不超过 -0.36 m/s^2 , 可有效提高驾驶人的舒适性、平顺性和安全性。

关键词: 自适应巡航; 模型预测控制; 可变目标距离; 堵车蠕行; 旁车切入

中图分类号: U27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2023)05-0499-11

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.136

A Model Predict Control based Adaptive Cruise Control of Variable Target Distance

ZHAO Ya'nan¹, WANG Taixiang¹, GAO Li¹, SUN Haixin², WANG Xiancai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Art and Design, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To solve the problems presented to the adaptive cruise system in the complex traffic environment, an adaptive cruise control algorithm with variable target distance control algorithm was proposed. The complex traffic conditions mainly consider as following two aspects. A side car cut into the front of the vehicle, causing the expected relative distance obtained from the target expected distance calculation model emerge a step change from the actual relative distance. Closing to the car in front, the target vehicle must start and stop constantly in congested road conditions, causing the speed, acceleration and relative distance of the target vehicle continue change, resulting in driving smoothness. For driving comfort and safety, the adaptive cruise control algorithm was arranged firstly to establish a discrete longitudinal kinematics prediction model based on the model predictive control theory. And then, considering the chassis acceleration response, the ultimate safe longitudinal following distance, the physical limitations of the vehicle itself, the driver's riding comfort and other optimal control objectives, the soft factor was introduced to obtain the feasible solution online. The algorithm was simulated and tested in real vehicles under different cut in conditions, comprehensive driving conditions and traffic jam creeping conditions, and the open-loop experiment of IDM algorithm was conducted with data. The comparison of re-

收稿日期: 2022-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0105205-02, 2017YFC0804808, 2017YFC0804803)资助

作者简介: 赵亚男(1972—), 女, 副教授, 博士后, E-mail: zyn@bit.edu.cn.

通信作者: 王泰翔(1998—), 男, 硕士研究生, E-mail: 1013211604@qq.com.

search results shows that the adaptive cruise control algorithm considering the variable target distance of the cut in by the side vehicle can provide a maximum impact of -0.25 m/s^3 on the longitudinal control under the acceleration cut in conditions of the side vehicle, lowering 50% than the IDM model. The maximum deceleration generated by longitudinal control in the traffic jam creeping condition can achieve -0.3 m/s^2 , lowering 30% than the IDM model. In the comprehensive condition and constant speed cruise condition, the algorithm can achieve stable longitudinal control of the vehicle, maintaining a safe distance, and the acceleration amplitude is not more than -0.36 m/s^2 , improving the driver's comfort, smoothness and safety effectively.

Key words: adaptive cruise control; model predict control; variable target distance; traffic jam creeping; side car cut in

车辆在复杂交通环境中行驶时,驾驶人感知信息和判断决策的全过程会受到运行环境复杂度的影响^[1-5],复杂程度越大会使得工作负荷迅速增加,导致较高的交通事故发生率.自适应巡航系统的出现有效地减少了驾驶人的工作负荷^[6],但是自适应巡航控制算法面对旁车切入工况,利用车头时距和车速计算得到目标期望距离发生阶跃突变,控制层计算得到的减速度幅值过大,导致无法获得较好的驾驶平顺性、舒适性和安全性.

在车辆动态跟踪前车的纵向运动过程中,车辆舒适性、平顺性、安全性是自适应巡航系统的两个重要的性能指标^[7].过于剧烈的加速度变化会降低乘员的舒适性,较大的纵向加速度和阶跃的冲击度引起车辆的轴荷转移和较大的俯仰角变化,导致车辆平顺性的降低.过大幅值的减速度在交通流中也容易引起追尾事故等安全性问题,直接影响驾驶人对 ACC 的使用.

动态车间距的自适应巡航系统在不同场景提供不同的车间距算法,有利于提供车辆的自适应性和稳定性.目前国内外对自适应巡航的车间距算法模式划分主要依靠与前车的相对速度,相对加速度以及纵向距离.间距划分策略主要应用于工况划分,基于车头时距的可变目标距离的划分策略被广泛使用^[8].裴晓飞等^[7]和 BAREKET 等^[8]将 ACC 划分为 8 种模式,利用跟车时距和避撞时间倒数来划分不同模式,但是在实车验证上本车加速度的抖动变化难以保证驾驶人的舒适度要求. BAREKET 等^[9]利用相对车速和车间距将自适应巡航分为 6 种模式,但是实车实验中难以确定模式的分界. CANALE 等^[10]利用前车的纵向状态,将本车 ACC 分为匀速、加速和减速 3 种工况,利用驾驶人模型进行分层控制,但是实际 3 种模式难以应对复杂道路情况,在旁车切入下的纵向控制策略无法提供合理且舒适的加速度.

ARNE 等^[11]利用宏观和微观交通流中,利用观测以及经验等得到的数据提出的 IDM 模型,该模型能良好的模拟高速场景下随着前车距离和速度引起的本车的加速度变化,该模型由于仿真模拟和实车测试中差距较大,该模型在后人的工作中不断被更新,修正.张德昭等^[12]通过使用零期望加速度曲线,把模式区分为定速巡航,车速保持、接近和超车,避免了车辆在模式切换中的加速度阶跃问题.孙晓文等^[13]将自适应巡航划分为巡航速度控制和跟车时距控制来保证跟车安全,但是过少的模式无法应对复杂且低速的情况.马成国等^[14]使用逆动力学模型使用改进 pid 的算法开发了制动压力控制器,实现了自适应巡航对主动制动控制的要求.李亮等^[15]将粒子群算法的优点作为模型预测控制的滚动优化方法进行求解,极大的提升了运算速度.邹汉鹏等^[16]提出一种具有自适应补偿能力的反馈校正模型预测控制器设计方法,具备良好的抗干扰能力,提高了 ACC 系统的跟车安全性和乘坐舒适性.

针对自适应巡航系统现存的旁车切入跟车距离突变引起本车加速度阶跃引起的驾驶平顺性、舒适性和安全性问题,本文提出一种基于模型预测控制的可变目标距离自适应控制模型.根据本车速度与前车的运动状态关系^[17-18],建立动态目标车辆期望距离模型,使用离散化车辆跟驰运动学模型,对本车辆在预测时域进行模型预测,并针对安全性、舒适性、安全性等目标引入松弛因子进行优化得到可行解,并不断滚动优化,完成旁车切入本车道前方与车辆跟驰的纵向控制,并通过实车验证了可变目标距离自适应循环控制的可行性和有效性.

1 可变目标距离自适应巡航控制

1.1 自适应巡航控制框架设计

多数自适应巡航系统利用 ECU 在整车控制器中

实现节气门开度, 制动主缸压力与目标车辆动态参数的联合计算控制, 为了实现自适应巡航系统与其他 ADAS 模块的并行使用与独立控制, 本文利用分层控制系统, 增加整车的开发效率, 减少对下层执行层的直接控制、降低上位机二次开发的难度, 减少开发周期, 本文选择使用分层设计理念对 ACC 结构进行设计, 将车辆分为感知融合层, 上位控制器和下位线控底盘执行器, 利用感知融合层和底盘发送得到的前方障碍物车辆与本车的相对运动状态信息和本

车运动状态信息, 通过上层控制器利用上述信息进行车辆现处工况判断, 加速度规划层通过控制模型对相应工况采取基于模型预测控制的纵向控制算法得出期望车辆纵向期望加速度, 下发下位控制器, 线控底盘执行层利用 PID 算法依赖车辆动力学特性, 调节制动主缸压力和节气门开度, 迅速使车辆达到期望加速度, 同时本车自身运动状态反馈给加速度规划层进行闭环控制, 从而实现自适应巡航功能. 可变目标距离自适应巡航控制体系结构如图 1 所示.

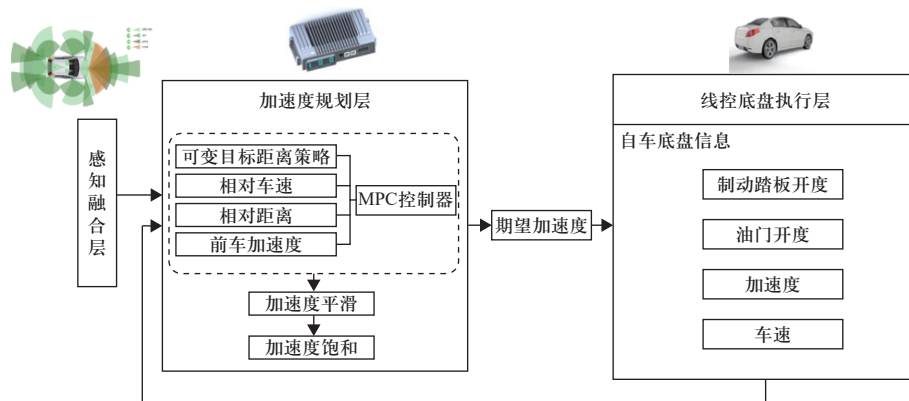


图1 可变目标距离自适应巡航控制体系结构

Fig. 1 Variable target range adaptive cruise control architecture

在加速度规划层中利用本文提出的自适应巡航可变距离计算模型, 利用目标车辆的相对距离、速度以及底盘反馈的本车运动状态信息, 建立本车纵向自适应巡航运动学模型, 并对平顺性、舒适性和安全性等多目标进行二次型构建, 引入松弛因子在各运行步长滚动优化求得控制量增量的可行解, 再利用实车实验验证可行性和有效性.

1.2 自适应巡航控制模型构建

自适应巡航为没有横向控制参与的纵向加速度控制模型, 考虑到车辆利用前车运动状态信息与底盘反馈信息对前车的速度和期望加速度进行追踪,

根据两车之间相对运动关系, 对车辆运动学进行建模并假设本车线性底盘可以良好且较快地对上层加速度规划控制器下发加速度进行跟踪, 其期望加速度 a_{des} 与实际底盘 a_0 执行加速度为一阶惯性环节传递函数见式(1).

$$a_0 = \frac{K_p}{T_p s + 1} a_{des} \quad (1)$$

如图2所示, ACC控制车辆纵向运动学关系. 其中 d 表示实际车距, 为本车头与目标车辆后保险杠距离, d_t 为上文描述期望跟车距离, Δd 为实际车距与期望跟车距离的差值.

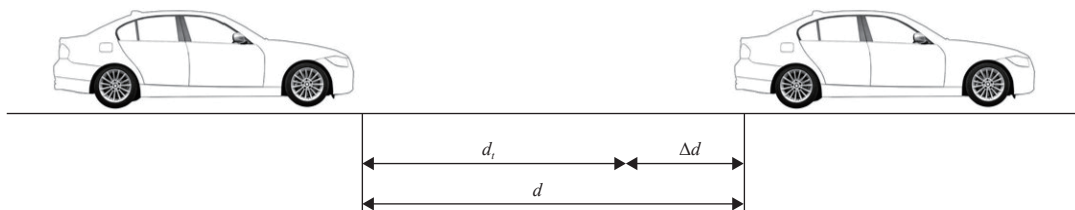


图2 自适应巡航跟驰运动学模型

Fig. 2 Kinematic model of adaptive cruise car following

根据本车与前车的运动学特性以及底盘执行器的一阶惯性环节的假定, 对车辆运动学模型进行离

散化建模如下.

$$\begin{cases} \Delta d(k+1) = \Delta d(k) + [\Delta v(k) - \tau a_0(k)] T_s \\ \Delta v(k+1) = \Delta v(k) + [a_1(k) - a_0(k)] T_s \\ a_0(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{T_p}\right) a_0(k) + \frac{K_p T_s}{T_p} u(k) \\ j(k+1) = \frac{K_p}{T_p} u(k) - \frac{1}{T_p} a_0(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_0 为本车当前速度; Δv 为两车速度差; a_0 为本车加速度; a_1 为目标车辆加速度; K_p 与 T_p 为线控底盘执行器的一阶惯性环节系统增益和时滞; T_s 为系统采样步长即采样周期。

设 $\mathbf{x}(k) = [\Delta d(k), \Delta v(k), a_0(k), j(k)]$, $\mathbf{x}(k)$ 为系统状态空间向量, 控制系统 $u(k)$ 输入为期望底盘加速度 a_{des} , 前车加速度 $a_1(k)$ 为控制系统的扰动量 $\varphi(k)$, 系统的输出量为 $y(k)$, 同时为了增加系统的鲁棒性, 提高自适应巡航模型的预测精度, 增加误差修正项 $e(k)$, 引入 $\mathbf{M} = \text{diag}(m_1, m_2, m_3, m_4)$ 的对角修正矩阵. 由此可将自适应巡航纵向运动学模型整理见式(3).

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{G}\varphi(k) + \mathbf{M}e(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{x}(k)$ 为系统实际可观测状态量, $\mathbf{x}(k+1)$ 为已知 $\mathbf{x}(k)$ 时刻状态后对下一时刻的预测量。

式中各系数矩阵见式(4)。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & T_s & -\tau T_s & 0 \\ 0 & 1 & -\tau T_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 - T_s/T_p & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_p & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= [0 \ 0 \ K_p T_s/T_p \ K_p/T_p]^T \\ \mathbf{G} &= [0 \ T_s \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

2 可变目标距离自适应巡航控制策略

自适应巡航控制包括了传统定速巡航控制和自适应跟踪控制与前车的期望距离, 根据车辆的运动关系以及前车的运动状态, 通过控制本车加速度使得前车与本车的纵向距离始终保持期望距离左右, 完成车辆自适应跟驰^[19]. 车辆跟驰中驾驶人采用设定车头时距的办法来调整两车之间的期望距离, 车头时距的定义为

$$\tau = \frac{c}{v_0} \quad (5)$$

式中: c 为两车纵向距离; v_0 为本车车速; τ 为车头时距。

自适应巡航控制的期望距离 d_{des} 目前有两种较为流行的应用方法, 一种是定期时距模型, 该方法在驾

驶人确定跟车时距后期望距离仅随本车运动速度而发生改变, 式中 d_0 为最小停车距离。

$$d_{des} = v_0 \tau + d_0 \quad (6)$$

2.1 可变车头时距模型

由于传统的定车头时距无法处理前车动态的运动状态变化, 难以在前车速度波动的工况下保持本车对其进行稳定的跟踪, 而且不考虑前车车速的定车头时距计算得出的期望距离在前车速度波动较大时, 加速度规划层的输入量与参考量的偏差较大, 导致上位控制器计算得出的加速度波动频率增加, 车辆由于冲击度变大导致驾驶人舒适性降低. 因此本文对期望距离进行改进并提出一种变车间时距 (variable time headway, VTH), 见式(7):

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\min}, & \tau < \tau_{\min}, \\ \tau_0 - a \times (v_1 - v_0) - b \times a_{header}, & \tau_{\min} \leq \tau < \tau_{\max} \\ \tau_{\max}, & \tau > \tau_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

$$d_{des} = d_0 + \tau \times v_0 + kv_0 \times (v_0 - v_1) \quad (7)$$

式中: τ_0 为驾驶人设定车头时距; a 为相对速度的权重参数; b 为前车加速度的权重参数, k 为常数; τ_{\min} 和 τ_{\max} 为饱和车头时距, 本文设定为 0.8 s 和 2 s。

2.2 旁车加速切入下可变目标距离调整

当本车处于旁车切入本车道前方工况时, t 时刻前车加速切入且速度大于等于本车, 期望距离即优化代价函数中的参考与实际距离的差值 Δd 突然增大, 见式(8):

$$\Delta d_t = d_0 + \tau \times v_0 + kv_0 \times (v_0 - v_1) - d_t \quad (8)$$

由此, 本文利用时间步长的增长对目标距离延迟, 采用一阶惯性环节, 其阶跃响应曲线如图3所示, 其滤波效果作用为延迟期望目标距离作用在加速度规划控制器的响应。

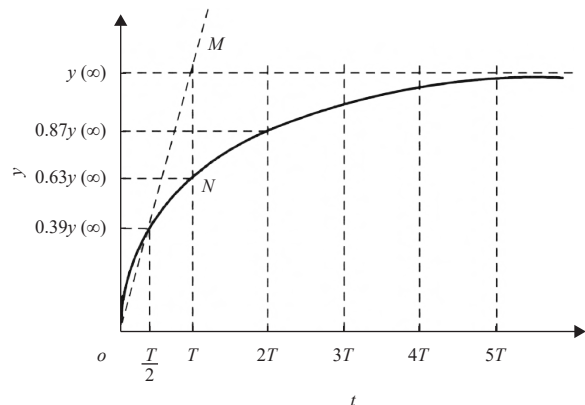


图3 一阶惯性环节阶跃响应曲线

Fig. 3 Step response curve of first-order inertial link

传递函数表达如下:

$$d_t = \frac{K_d}{T_s + 1} d_{des} \quad (9)$$

式中 K_d 取 1, T 取 10, 并进行离散化处理, 得到式 (10):

$$d_t = d_{t-1} + 0.1(d_{des} - d_{t-1}) \quad (10)$$

2.3 低速堵车蠕行工况控制策略调整

由于车辆发生堵车工况时, 目标车辆在复杂交通流中不断启停. 如果自车跟驰控制存在时滞或者超调, 会导致两车相对距离难以在正常控制策略的期望距离上迅速收敛导致本车在逼近两车期望相对距离时候加速度下发较为抖动, 较大的冲击度, 会引起驾驶人实际驾驶体验急剧下降. 当目前车辆所处交通情况导致其驾驶行为为急减速, 本车与目标车辆的相对距离会急剧减少, 而本车自适应巡航控制策略中加速度有上下限的饱和限制, 无法迅速下发大减速带的指令制动, 导致本车刹车不及时, 造成追尾事故.

因此, 本文将期望距离与前车的加速度作为期望的参考, 同时增加状态量中, 车辆加速度的权重, 降低期望距离与实际距离误差的权重. 因为低速堵车工况, 两车相对距离较近, 若按照城市道路和高速场景工况设计代价函数, 目标期望距离与实际距离相差较小, 同样权重下, 影响优化参数的结果也越轻微, 同时, 考虑到低速工况, 驾驶员实际期望的是跟踪前车动作, 期望保持固定安全距离下与前车执行相同动作, 所以增加状态量中本车加速度与期望的误差权重, 本文的优化目标权重矩阵式 (23) 体现.

其中加速度的参考值如式 (11)

$$a_{ref} = 1.4 \times [1 + 0.4 \times a_1 + \frac{v_1 - v_0}{v_0 + 2} - \left(\frac{d_{des} + 20}{d_r + 20} \right)^2 + 0.08 \times 0.1 \times (d_r - d_0)^3] \quad (11)$$

式中: a_{ref} 为加速度的参考值; a_1 为目标车辆的加速度; v_1 为目标车辆速度; v_0 为本车车速; d_r 为实际车距; d_0 为最小安全车距.

3 多目标优化的模型预测控制

3.1 模型预测控制目标分析

3.1.1 纵向控制期望响应

考虑到驾驶人实际驾驶体验以及提高交通流的思想^[20], 过小车距会引起驾驶人对车辆自身安全的心里压力, 过大的跟驰距离会引起旁车切入本车的风险, 而且若跟车距离在期望距离值上下浮动, 导致车辆加加速度在 0 点震荡会引起驾驶人的不适, 因此待优化目标为

$$\begin{cases} \Delta d \rightarrow 0 \\ \Delta v \rightarrow 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: Δd 为相对距离和目标距离的误差; Δv 为两车速度差.

3.1.2 极限跟车安全距离

为了自适应巡航系统的驾驶绝对安全, 利用碰撞时间 (ttc) 严格约束两车相对距离, 控制车辆紧急制动的安全, d_0 为式 (6) 中的最小停止跟车距离

$$d = \max \begin{cases} \text{ttc} \Delta v \\ d_0 \end{cases} \quad (13)$$

为了提高驾驶人的安全性, 应限制优化两车相对速度的大小, 过大的速度差难以保证加速度的幅值不能超出饱和期限.

$$\Delta v_{\min} \leq \Delta v \leq \Delta v_{\max} \quad (14)$$

3.1.3 极限舒适度约束

过大或过小的加速度都会严重影响车辆的舒适度且车辆的冲击度作为纵向加速度的一阶导数, 影响驾驶人纵向受力大小^[19], 表示为加速度的突变情况, 因此二者同为本文优化的目标, 在有效控制的前提下尽可能小.

$$\begin{cases} \min |j| \\ \min |a_0| \end{cases} \quad (15)$$

同理二者存在饱和的硬约束如式:

$$\begin{cases} a_{0,\min} \leq a_0 \leq a_{0,\max} \\ j_{\min} \leq j \leq j_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

因此待优化目标与状态向量的关系为

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (17)$$

式中, $\mathbf{C} = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$.

3.1.4 参考纵向轨迹

由于自适应巡航目标为期望状态空间向量在一定控制步长内趋近于 0, 但考虑到驾驶人的舒适性等要求, 期望状态值平滑非阶跃的跟踪目标轨迹, 所以利用指数衰减函数^[20]对待优化目标向量进行线性加权, 由于衰减权重函数为对角矩阵且对角项小于 1, 参考纵向轨迹可在预测步长内平缓趋近 0. 得到在预测步长的跟踪目标.

如 1.2 中所示, $\mathbf{x}(k) = [\Delta d(k), \Delta v(k), a_0(k), j(k)]$, $\mathbf{x}(k)$ 为系统状态空间向量, 控制系统 $\mathbf{u}(k)$ 输入为期望底盘加速度 a_{des} , 前车加速度 $a_1(k)$ 为控制系统的扰动量 $\boldsymbol{\varphi}(k)$

$$\mathbf{y}_{ref}(k+i) = \boldsymbol{\mu}^i \mathbf{y}(k) \quad (18)$$

式中 $\boldsymbol{\mu}$ 为权重系数, $\boldsymbol{\mu} = \text{diag}(\mu_{\Delta d}, \mu_{\Delta v}, \mu_{a_0}, \mu_j)$.

3.2 模型预测与多目标优化

对于离散状态空间方程, 建立新的系统预测方程:

$$\boldsymbol{\xi}(k+1) = [\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k-1)]^T \quad (19)$$

利用上式, 将系统状态方程表达式改写成与上一步长的增量形式与推导如下.

$$\begin{aligned}
\xi(k+1) &= \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{G}\varphi(k) + \mathbf{M}e(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k-1) + \mathbf{B}u(k) - \mathbf{B}u(k-1) + \mathbf{G}\varphi(k) + \mathbf{M}e(k) \\ u(k-1) + u(k) - u(k-1) \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k-1) \\ u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}u(k) - \mathbf{B}u(k-1) \\ u(k) - u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}\varphi(k) + \mathbf{M}e(k) \\ 0 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ 0 & \mathbf{I}_{N_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{I}_{N_u} \end{bmatrix} (u(k) - u(k-1)) + \begin{bmatrix} \mathbf{G}\mathbf{I}_{N_x} \\ 0 \end{bmatrix} \varphi(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{M}\mathbf{I}_{N_x} \\ 0 \end{bmatrix} e(k) = \\
&= \mathbf{A}^{\sim}\xi(k) + \mathbf{B}^{\sim}\Delta u(k) + \mathbf{G}^{\sim}\varphi(k) + \mathbf{M}^{\sim}e(k) \\
\eta(k) &= \mathbf{C}^{\sim}\xi(k)
\end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{C}^{\sim} = [\mathbf{I}_{N_x} \quad 0]$; $\eta(k)$ 为系统输出状态量; 定义预测时域步长为 N_p ; 控制时域步长为 N_c ; 对应输出变量

$$\begin{cases} \mathbf{Y} = [\eta(k+1), \eta(k+2) \cdots \eta(k+N_c) \cdots \eta(k+N_p)]^T \\ \Delta \mathbf{U} = [\Delta u(k), \Delta u(k+1) \cdots \Delta u(k+N_c-1)]^T \\ \Phi = [\varphi(k), \varphi(k+1) \cdots \varphi(k+N_p-1)]^T \end{cases} \quad (21)$$

因此整理得到新的离散空间方程, S_p, S_u, G_p, M_p 式中各项矩阵分别为

$$\begin{aligned}
S_p &= [\mathbf{C}^{\sim}, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim}, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim 2}, \cdots, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_c}, \cdots, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p}]^T \\
S_u &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{B}^{\sim} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim}\mathbf{B}^{\sim} & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{B}^{\sim} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_c-1}\mathbf{B}^{\sim} & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_c-2}\mathbf{B}^{\sim} & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_c-3}\mathbf{B}^{\sim} & \cdots & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim 0}\mathbf{B}^{\sim} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-1}\mathbf{B}^{\sim} & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-2}\mathbf{B}^{\sim} & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-3}\mathbf{B}^{\sim} & \cdots & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-N_c}\mathbf{B}^{\sim} \end{bmatrix} \\
G_p &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{G}^{\sim} & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim}\mathbf{G}^{\sim} & \mathbf{G}^{\sim} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-1}\mathbf{G}^{\sim} & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-2}\mathbf{G}^{\sim} & \cdots & \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{G}^{\sim} \end{bmatrix} \\
M_p &= [\mathbf{C}^{\sim}\mathbf{M}^{\sim}, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim}\mathbf{M}^{\sim}, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim 2}\mathbf{M}^{\sim}, \cdots, \mathbf{C}^{\sim}\mathbf{A}^{\sim N_p-1}\mathbf{M}^{\sim}]^T
\end{aligned} \quad (23)$$

根据上文建立的预测方程, 考虑到综合响应与舒适度的效果, 利用 MPC 框架进行优化协调, 针对优化目标与控制目标建立在 N_p 时域内滚动优化, 具备二次型性的目标函数如式 (24) 所示。

$$\begin{aligned}
\mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} d_q & v_q & a_q \\ & & j_q \end{bmatrix} \\
J(k) &= \sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i) - y_{\text{ref}}(k+i)\|_{\mathbf{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i)\|_{\mathbf{R}}^2 + \rho \varepsilon^2
\end{aligned} \quad (24)$$

式中: \mathbf{Q} 矩阵和 \mathbf{R} 矩阵为优化系统输出状态向量与控制状态向量的权重矩阵, 本文为了直接对控制系统增量进行限制来防止控制量阶跃过大且防止无法在滚动优化中求得可行解, 且增加了软约束, 其中 ρ 为权重系数, ε 为松弛因子。

联合式 (18) ~ (24) 将目标函数结合限定优化条

件转换成标准二次型的形式并忽略常数项, 解决以下优化问题:

$$J(\mathbf{Y}, \Delta \mathbf{U}, u(t-1)) = [\Delta \mathbf{U}(t)^T, \varepsilon]^T \mathbf{H}_t [\Delta \mathbf{U}(t)^T, \varepsilon] + 2\mathbf{G}_t [\Delta \mathbf{U}(t)^T, \varepsilon] \quad (25)$$

式中, 有:

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}_t &= \begin{bmatrix} \mathbf{S}_u^T \mathbf{Q}_Q \mathbf{S}_u + \mathbf{R}_R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \\
\mathbf{G}_t &= [\xi^T(k) (\mathbf{S}_p^T - \mu^T) + \varphi^T \mathbf{G}_p^T + e^T(k) \mathbf{M}_p^T \mathbf{Q}_Q \mathbf{S}_u, 0] \\
\mathbf{Q}_Q &= \mathbf{I}_{N_p} \mathbf{Q} \\
\mathbf{R}_R &= \mathbf{I}_{N_p} \mathbf{R}
\end{aligned} \quad (26)$$

考虑上述对于状态向量与控制向量约束的边界, 定义系统约束为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U} \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ \mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{A} \Delta \mathbf{U} + \mathbf{U}_t \leq \mathbf{U}_{\max} \\ \mathbf{Y}_{\min} - \varepsilon \leq \mathbf{S}_p \xi(k) + \mathbf{S}_u \Delta \mathbf{U} \leq \mathbf{Y}_{\max} + \varepsilon \end{cases} \quad (27)$$

式中各个参数为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{N_c \times N_c},$$

$$U_t = 1_{N_c} \otimes u(k-1) \quad (28)$$

由此,利用上述公式在每一步长进行优化求解后,可求得一系列控制时域的控制输入增量 ΔU^* .

$$\Delta U^* = [\Delta u^*(k), \Delta u^*(k+1), \Delta u^*(k+2), \dots, \Delta u^*(k+N_c-1)]^T \quad (29)$$

利用控制序列的第一个元素作为实际下一步长的控制增量,则下一步长控制量为

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u^*(k) \quad (30)$$

随后在每一步长进行滚动优化实现自适应巡航车辆纵向控制.

4 可变目标距离自适应控制实验验证

为了进一步验证可变目标距离自适应控制的有效性,本文对实验车辆进行多工况的纵向控制实验,实验中,期望加速度为上位控制器加速度规划层计算下发,利用设定的不同工况录制车辆使用该纵向控制算法对不同场景的加速度响应,由此验证算法对前车速度与期望距离进行跟踪的可行性与驾驶人的舒适性.控制器的控制参数如表1所示,控制状态变量与系统状态变量,目标约束边界,松弛因子系数均可调节.

表1 控制系统参数

Tab. 1 Control system parameters

参数	数值
Q	$\text{diag}(1, 1, 1, 1)$
R	1
ρ	$\text{diag}(3, 3, 3, 3)$
Δu_{\min}	-0.2
Δu_{\max}	0.3
u_{\min}	-1.6
u_{\max}	1.4
ttc	-3
μ	$\text{diag}(0.8, 0.8, 0.8, 0.8)$

由于本文针对旁车加速切入本车道车辆前方工况、正常跟驰以及低速蠕行工况建立自适应巡航模型,其中旁车切入工况可细分为旁车未切入时本车稳定跟随目标车辆行驶工况,和旁车切入越过车道线,本车与新目标车辆距离大幅度缩短,跟踪新目标车辆的工况,为验证算法可靠性,对上述工况进行仿真和实车验证.

4.1 仿真验证

本文利用上述算法对前方无目标车辆下有目标车辆的中高速混合工况以及旁车切入工况进行仿真实验,试验结果如图4所示.

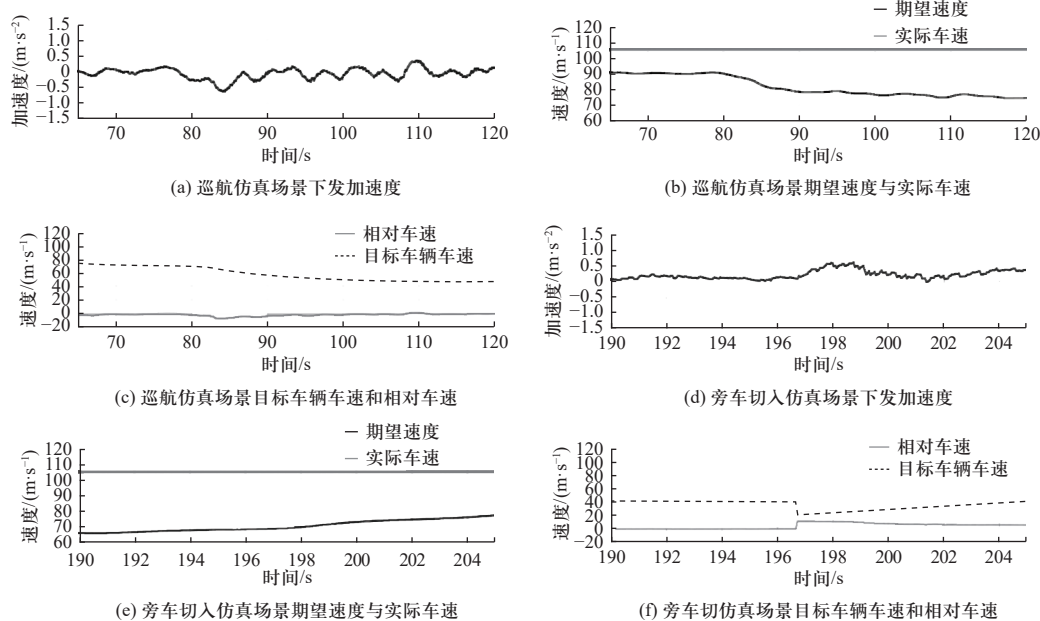


图4 仿真场景加速度数据

Fig. 4 Simulation scene acceleration data

仿真实验表明,车辆有目标车辆的复杂跟驰状态可以实现稳定自适应巡航功能,其中加速度下发

控制在 $-0.6 \text{ m/s}^2 \sim 0.6 \text{ m/s}^2$ 之间,符合车辆动力学特性,且与目标车辆相对距离没有低于实验设定的最

小安全距离,冲击度保持在 $\pm 0.3 \text{ m/s}^3$ 以内,从仿真结果看来,本文算法可以在不同车速良好实现自适应巡航功能。

4.2 实车验证

实验车辆的工控机,整车控制器,激光雷达等实现设备如图5所示。



图5 车载实验设备

Fig. 5 On board experimental equipment

4.2.1 跟驰行驶工况及蠕行工况

稳定跟驰实验结果如图6(a)、图6(b)、图6(c)显示,前车稳定行驶,车速均在80 km/h附近,三项分别

表示为控制加速度与车辆实际加速度、本车车速、与目标车辆相对距离和相对速度,其中本车加速度均在 $-0.3 \text{ m/s}^2 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$ 之间,满足驾驶平顺性和舒适性对加速度幅值的要求,本车良好跟踪目标车辆车速,且与目标车辆保持稳定期望距离,两车相对车速绝对值保持在3 m/s内,该实验证明了本文算法在稳定跟驰工况的平顺性与安全性,验证了算法可靠性,另分析加速度的轻微波动是由于目标车辆车速在80 km/h上下浮动,引起的本车目标车速发生变化,但控制层计算加速度在预期范围。

蠕行跟驰试验结果如图6(d)、图6(e)、图6(f)显示,目标车辆在低速低幅值较高频率速度波动过程中,车速反复在10到16 km/h范围内波动,本车加速度保持在 $-0.3 \text{ m/s}^2 \sim 0.2 \text{ m/s}^2$ 之间,相比于IDM算法,最大减速度的幅值缩小了33.3%,两车相对距离保持在安全距离以上,满足驾驶平顺性和舒适性对加速度幅值的要求。在前车动作跟踪角度分析,两车的相对速度没超过2 km/h,具有良好的动作跟踪性,证明了文中算法在稳定跟驰工况的平顺性与安全性,验证了算法可靠性。

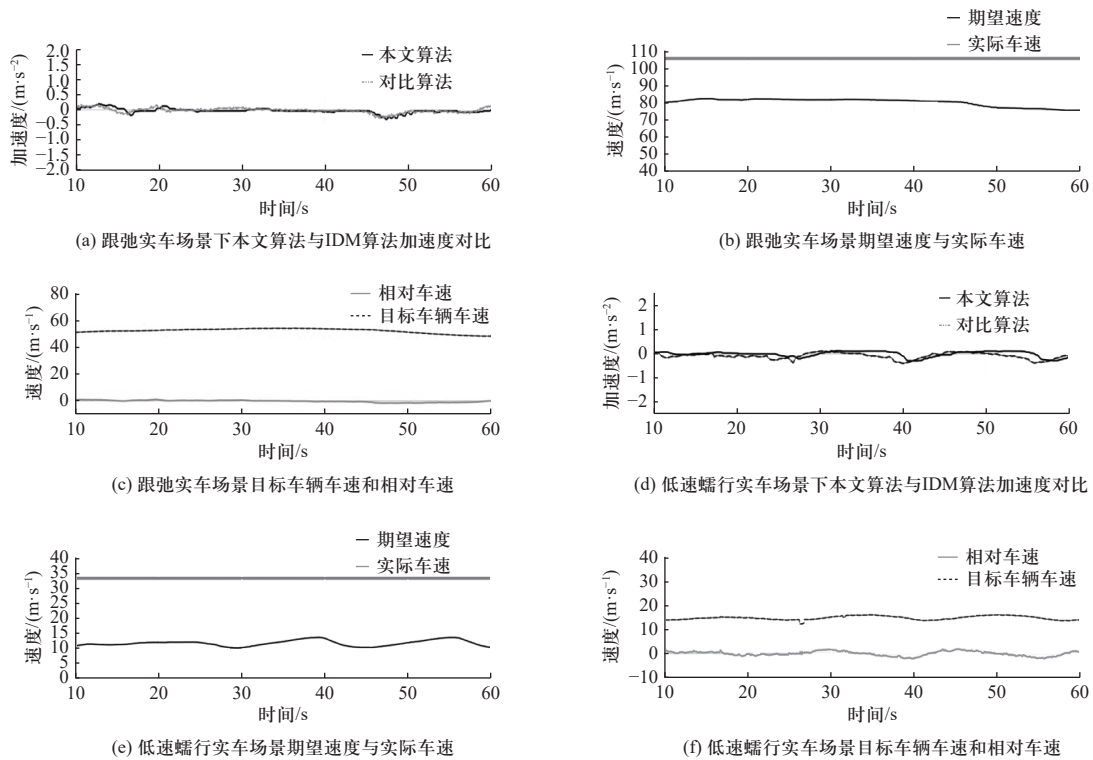


图6 跟驰行驶工况

Fig. 6 Car following data under conditions cut in by side vehicle

4.2.2 旁车加速切入工况

在高速公路中间车道进行旁车加速切入工况实

验如图7所示,考虑到该算法的需求为在前车加速切入时保证驾驶人的舒适性与平顺性,纵向控制算

法控制车辆逐步将相对距离拉至期望目标距离值, 而且控制算法需要在前车减速切入本车道前方时进行积极的纵向减速以保证驾驶安全性。

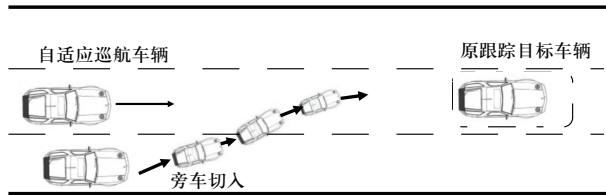


图7 旁车切入轨迹

Fig. 7 Schematic diagram of side car cut in

如图8(a)、图8(b)、图8(c)所示, 当本车车速为98 km/h 稳定跟踪目标车速时, 110 s、115 s 和 131 s 时刻旁车道车辆以较本车车速更大的速度并线行驶进入本车道车辆前方。实验表明, 本车获得了较好的驾驶舒适性和安全性, 在保证安全的前提下减速度在两秒内缓慢, 冲击度最大为 -0.25 m/s^3 、 -0.16 m/s^3 、 -0.3 m/s^3 验证算法在旁车加速切入的有效性, 文中算法冲击度幅值为开环实验的 IDM 算法的 1/2, 有效

证明了算法在旁车切入工况下提供较好的舒适性与平顺性, 从安全距离上可以看出本车保证了与前车的最小安全距离, 保障了本车的安全性。

考虑到旁车可能低速切入本车道车辆前方的工况, 需要验证本车自适应巡航在该工况可以积极减速, 对该工况在高速进行实车验证如图8(b)、图8(d)、图8(f)所示。在31 s 时刻, 旁车道切入车辆车速较低, 与本车的相对速度从18 km/h 阶跃至 -19 km/h , 两车相对距离从85 m 阶跃至55 m, 由于为保证安全距离, 本车积极下发减速度, 并考虑舒适性与安全的情况下, 下发减速度至 -1.6 m/s^2 , 本车车速在7 s 内由95 km/h 下降至69 km/h, 安全距离在短时间内缩短后迅速提升至50 m, 保证驾驶人的安全性。由于减速期间减速冲击度为 -0.23 m/s^3 , 相比与IDM 开环实验的结果, 本车使用的控制算法在旁车低速切入时减速积极, 减速度下发平顺, 提高了驾驶人的舒适性和车辆平顺性, 保障驾驶安全, 验证了算法在该工况的可靠性。

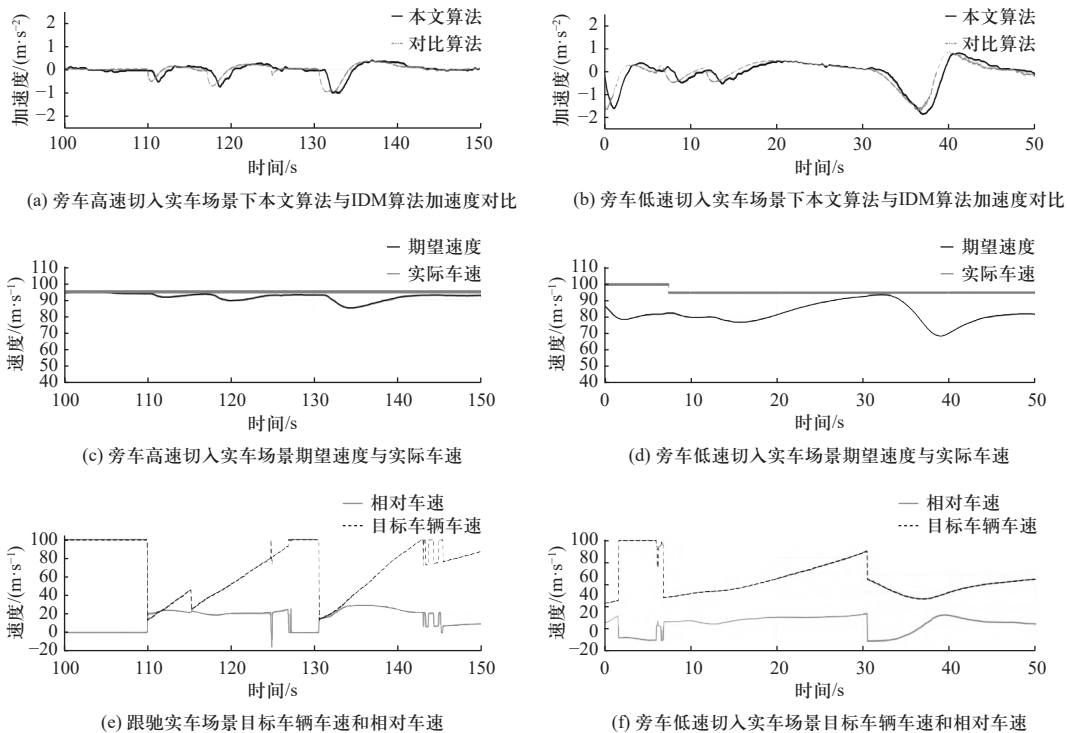


图8 旁车切入工况

Fig. 8 Side car cut in working condition

5 结论

论文采用上层加速度规划与下层线控底盘执行机构相结合的分层控制方式, 基于多目标优化的模

型预测, 采取可变目标自适应巡航控制策略完成车辆纵向控制。

考虑到驾驶人在旁车加速切入本车前方且相对速度为正时, 加速度规划层利用可变跟车时距对目

标车辆进行跟踪,在堵车导致目标车辆幅值较低频率较高的速度波动,车辆蠕行工况中,加速度规划层利用调节二次型的状态量代价函数权重,以跟动作代替跟踪距离的策略完成车辆的纵向控制.并对稳定跟驰工况、旁车较本车相对速度大于 0 的切入工况、旁车较本车相对速度小于 0 的切入工况进行了实车验证分析,并利用实验数据对 IDM 算法进行开环实验进行结果进行分析对比,主要结论如下:

不同工况下,加速度规划层控制算法的期望目标距离不同,车头时距不同,通过利用可变目标期望距离的调整策略,实现了稳定行驶与旁车切入下以安全且模仿驾驶人行为的加速度进行纵向控制,实现了两车相对速度与相对距离突变下的平稳过渡.

在速度低于 15 km/h 的工况下,更换控制策略,调整优化目标函数,将优化本车与目标车辆加速度的误差来代替相对距离与目标相对距离误差,在保证安全距离的情况下,良好的跟踪目标车辆的低速纵向动作,实现了低速跟驰的设计要求.

建立闭环自适应巡航控制系统,基于模型预测控制理论,对控制量变化,建立纵向跟驰运动学预测模型,针对乘坐舒适性,跟驰安全性,车辆自身限制等控制目标进行优化,引入松弛状态变量以求得可行解,实现控制算法滚动在线优化,在综合工况中表现良好.

研究表明,基于模型预测的可变目标距离自适应巡航控制在保证本车安全的前提下,在稳定跟驰行驶工况、旁车加速切入工况与低速蠕行工况相比传统 IDM 算法,本文控制算法使用较小幅值且平顺的加速度对车辆进行纵向控制,使得车辆产生的冲击度在 -0.23 m/s^3 之内,相比 IDM 模型冲击度幅值下降约 50%,在保障跟驰安全的前提下,满足自适应巡航的平顺性、舒适性.

参考文献:

- [1] ZHAO Yanan, LI Zhiwei, Gao Li, et al. Road-feature-based multiparameter road complexity calculation model of off-road environment[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1952792.
- [2] ZHAO Yanan, MENG Kaiwen, GAO Li. The entropy-cost function evaluation method for unmanned ground vehicles[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 410796.
- [3] YANG S, GAO L, ZHAO Y, et al. Research on the quantitative evaluation of the traffic environment complexity for unmanned vehicles in urban roads[J]. IEEE Access, 2021, 9: 23139 – 23152.
- [4] YANG S, Gao L, Zhao Y. A detection model of the complex dynamic traffic environment for unmanned vehicles[J]. IEEE Access, 2022, 10: 51873 – 51888.
- [5] LI S, LI K, RAJAMANI R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on control systems technology, 2010, 19(3): 556 – 566.
- [6] WU D, ZHU B, T D, et al. Multi-objective optimization strategy of adaptive cruise control considering regenerative energy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(14): 3630 – 3645.
- [7] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车自适应巡航系统的多模式切换控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 96–102.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, et al. Multi mode switching control of auto adaptive cruise system [J] Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48 (10): 96 – 102. (in Chinese)
- [8] BAREKET Z, FANCHER P S, Peng H, et al. Methodology for assessing adaptive cruise control behavior[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(3): 123 – 131.
- [9] CANALE M, MALAN S, MURDOCCO V. Personalization of ACC Stop and Go task based on human driver behaviour analysis[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2002, 35(1): 357 – 362.
- [10] KESTING A, TREIBER M, HELBING D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 368(1928): 4585 – 4605.
- [11] 张德兆, 王建强, 刘佳熙, 等. 加速度连续型自适应巡航控制模式切换策略[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1277 – 1281.
ZHANG Dezha, WANG Jianqiang, LIU Jiayi, et al. Acceleration continuous adaptive cruise control mode switching strategy[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition), 2010, 50(8): 1277 – 1281. (in Chinese)
- [12] 孙晓文, 汪洪波. 基于模式切换的汽车自适应巡航系统分层控制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(10): 1316–1321.
SUN Xiaowen, Wang Hongbo. Hierarchical control of vehicle adaptive cruise system based on mode switching [J] Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition), 2016 (39): 1316 – 1321. (in Chinese)
- [13] MILANÉS V, SHLADOVER S E, SPRING J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2013, 15(1): 296 – 305.
- [14] 马国成, 刘昭度, 裴晓飞, 等. 汽车自适应巡航控制主动制动

- 实现方法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(2): 120–124.
- MA Guocheng, LIU Zhaodu, PEI Xiaofei, et al. Realization method of auto adaptive cruise control active braking [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(2): 120 – 124. (in Chinese)
- [15] 安全, 王翔宇, 李亮. 智能混合动力汽车经济性自适应巡航控制策略研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(S1): 133 – 136.
- AN AN Quan, WANG Xiangyu, LI Liang. Research on adaptive cruise control strategy for economy of intelligent hybrid electric vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(S1): 133 – 136.
- [16] 黄菊花, 邹汉鹏, 刘明春. 考虑测量噪声的车辆自适应巡航控制系统纵向跟车研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(3): 254 – 261.
- HUANG Juhua, ZOU Hanpeng, LIU Mingchun. Study on longitudinal car following of vehicle adaptive cruise control system considering measurement noise[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(3): 254 – 261.
- [17] CHENG Y, GAO L, ZHAO Y, et al. Drivers' visual characteristics when merging onto or exiting an urban expressway[J]. PLoS one, 2016, 11(9): e0162298.
- [18] CHENG Y, ZHAO Y, ZHANG R, et al. Conflict resolution model of automated vehicles based on multi-vehicle cooperative optimization at intersections[J]. Sustainability, 2022, 14(7): 3838.
- [19] LIU J, KHATTAK A, HAN L, et al. How much information is lost when sampling driving behavior data? Indicators to quantify the extent of information loss[J]. Journal of intelligent and connected vehicles, 2020, 3(1): 17 – 29.
- [20] LUO L H, LIU H, LI P, et al. Model predictive control for adaptive cruise control with multi-objectives: comfort, fuel-economy, safety and car-following[J]. Journal of Zhejiang University-Science A:Applied Physics and Engineering, 2010, 11(3): 191 – 201.
- (责任编辑: 孙竹凤)