

基于MPC分层控制的自适应巡航策略

音建华, 牛礼民, 张义奇, 司 铭, 周天鹏

(安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 为减少车辆追尾等交通事故的发生, 同时提升跟车稳定性、经济性和乘坐舒适性, 提出1种车辆自适应巡航分层控制(adaptive cruise control, ACC)策略。上层控制器基于模型预测控制(model predictive control, MPC)计算车辆输出期望加速度, 并根据行车工况切换进行速度与间距控制; 下层控制器基于建立的纯电动汽车逆纵向动力学模型、驱动电机和制动模型优化驱动/制动切换策略, 并通过上层输出的期望加速度计算得到期望电机转矩或期望制动管路压力, 控制车辆的加速度和速度, 达到速度控制或间距控制的目的。在CarSim/Simulink中设置4种典型行车工况进行仿真实验, 验证提出ACC策略的性能。结果表明: 在定速巡航与跟车巡航工况下, 车辆能够快速稳定地跟随设定的初始速度行驶, 且与前车始终保持安全车距; 在紧急制动工况下, 车辆能够迅速做出减速反应, 与前车保持安全距离; 在复杂工况下, 车辆沿着期望路径行驶且平稳跟踪前车, 车辆跟随的动态响应良好。提出的控制策略在不同行驶工况下均可准确安全地跟踪目标车辆, 且可兼顾经济性和舒适性的要求。

关键词: 自适应巡航; 分层控制; 模型预测控制(MPC); 智能驾驶; CarSim/Simulink; 电动汽车

中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24049



Research on Adaptive Cruise Strategy Based on MPC Hierarchical Control

YIN Jianhua, NIU Limin, ZHANG Yiqi, SI Ming, ZHOU Tianpeng

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: In order to reduce the occurrence of rear-end collisions and other traffic accidents, while enhancing the stability, economy, and ride comfort during vehicle following, an adaptive cruise control (ACC) strategy with a hierarchical control structure was proposed. The upper controller was used to calculate the expected acceleration output for the vehicle based on the model predictive control (MPC), adjusting between speed and spacing control according to the switching of driving conditions. The lower controller was used to optimize the switching strategy between driving and braking based on the established an inverse longitudinal dynamics model of a battery electric vehicle, along with drive motor and braking models, and the expected motor torque or brake pipeline pressure was obtained by calculating the from the desired acceleration output of the upper layer. The acceleration and speed of the vehicle was controlled to achieve the goal of speed or spacing control. Four typical driving conditions were set up in CarSim/Simulink for simulation tests to verify the performance of the proposed ACC strategy. The results show that

收稿日期: 2024-03-29

基金项目: 智能汽车线控底盘系统安徽省重点实验室开放基金项目(QCKJ202401); 先进数控和伺服驱动技术安徽省高校重点实验室开放基金项目(XJSK202104)

作者简介: 音建华(1997—), 男, 安徽肥东人, 硕士生, 主要研究方向为智能汽车的轨迹跟踪与控制。

通信作者: 牛礼民(1976—), 男, 安徽肥东人, 博士后, 副教授, 主要研究方向为车辆动态性能模拟和电动汽车控制技术。

引文格式: 音建华, 牛礼民, 张义奇, 等. 基于MPC分层控制的自适应巡航策略[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(1):36-45, 71.

under both constant-speed cruise and follow cruise conditions, the vehicle can quickly and stably follow the preset initial speed while maintaining a safe distance from the preceding vehicle. Under emergency braking conditions, the vehicle can quickly decelerate and maintain a safe distance from the preceding vehicle. Under complex working conditions, the vehicle travels along the expected path smoothly and tracks the preceding vehicle with good dynamic response. The proposed control strategy ensures accurate and safe tracking of the target vehicle across different driving conditions, balancing the requirements for economy and comfort.

Keywords: adaptive cruise control; hierarchical control; model predictive control (MPC); intelligent driving; CarSim/Simulink; electric vehicle

随着汽车工业的快速发展,智能化日趋处于交通研究的前沿,先进驾驶辅助系统(advanced driving assistance system, ADAS)已经发展到 L2~L3 阶段,正处于高速发展阶段。根据国际数据公司(international data corporation, IDC)2023 年 4 月 28 日发布的《2022 年自动驾驶开发平台市场份额》,2022 年中国自动驾驶平台市场规模达到 8 112 万美元,增长率为 106%^[1]。自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)作为自动驾驶系统的核心技术之一,关系到智能车辆在行驶过程中的安全性、跟随性、经济性和舒适性。作为 ADAS 的重要分支,ACC 系统通过传感器采集车距及轮速等信号,通过上层控制器模型预测主车期望加速度,通过下层控制器模型控制车辆前进加速度和速度,使车辆以安全车速巡航或与前车保持安全距离稳定跟车行驶,避免追尾等事故的发生^[2-4]。但是,目前对于 ACC 分层控制系统的设计与实现仍存在诸多挑战,如上层/下层控制器的准确性与响应速度及整个控制策略的鲁棒性等。因此,开展分层控制的车辆自适应巡航策略,对于提升智能车辆的综合性能具有重要意义。

对于车辆自适应巡航控制,国内外学者常采用传统控制、模型预测和协同控制的策略。Tian 等^[5]针对电动汽车设计 1 种脉冲和滑动(pulse and glide, PNG)驱动策略的 ACC 系统,并使用智能遗传和粒子群算法对策略进行优化,实验结果表明相较于传统 ACC 系统,结合 PNG 策略的 ACC 系统可降低电动汽车 28.3% 的能源成本,但 ACC 的平稳跟踪性还需进一步改善。苑风霞等^[6]基于模型预测控制(model predictive control, MPC)算法设计 1 种电动汽车自适应巡航分层控制,仿真结果显示该策略能够比较稳定地跟踪中低速车辆,但仿真工况设置较少,难以验证现实复杂的行车工况及高速行驶时的路径跟踪。为提升智能车辆在特殊工况下的横纵向稳定性,周亚洲等^[7]基于五次多项式换道和跟车模型,设

计 1 种具有两层结构的协同控制策略,该策略可提升车辆在跟车和换道联合工况下的行驶安全性,但缺少实车实验验证。为实现 ACC 与巡航控制之间的自由切换,Shakouri 等^[8]提出 1 种非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)策略,预测参考轨迹所需的速度和车距,仿真测试结果表明该策略具有良好的控制性能,但控制系统设计单一,不能满足复杂道路环境的控制。冷姚等^[9]针对分布式电动汽车建立整车动力学模型,设计 1 种多模式分层控制的 ACC 系统,在多种控制模式下利用最优控制理论联合遗传算法求解系统增益系数,实现车辆在不同工况下能耗最小、转矩最优分配,仿真结果验证了该控制系统的可行性,但不同模式的切换会出现速度波动较大、舒适性降低等情况。刘西等^[10]采用 MPC 算法对传统燃油汽车自适应巡航进行控制,能够稳定地跟踪前车,保证行车安全性,但仿真工况设置较少且在复杂工况下实际车距不能稳定保持在期望车距范围,在低速换挡时加速度出现幅值波动,影响驾驶舒适性。

综上所述,传统算法面对日益复杂的交通状况显得过于局限,出现反应延迟、控制精度不高、跟车效果不佳等情况,影响交通流通。鉴于此,采用 MPC 算法优化纯电动汽车 ACC 控制策略,利用分层控制实现 ACC 功能,设置安全性、跟随性、舒适性和经济性 4 种控制约束对车辆系统性能进行综合优化,并通过 4 种典型工况进行仿真验证,避免车辆在不同工况因为控制状态变量不连续导致速度控制波动较大,使系统具有更好的容错率和鲁棒性。

1 车辆自适应巡航系统模型的建立

以纯电动汽车为研究对象建立 ACC 控制策略,采用 MPC 分层控制模式,系统控制框图如图 1。系统由感知层、决策层、执行层组成。

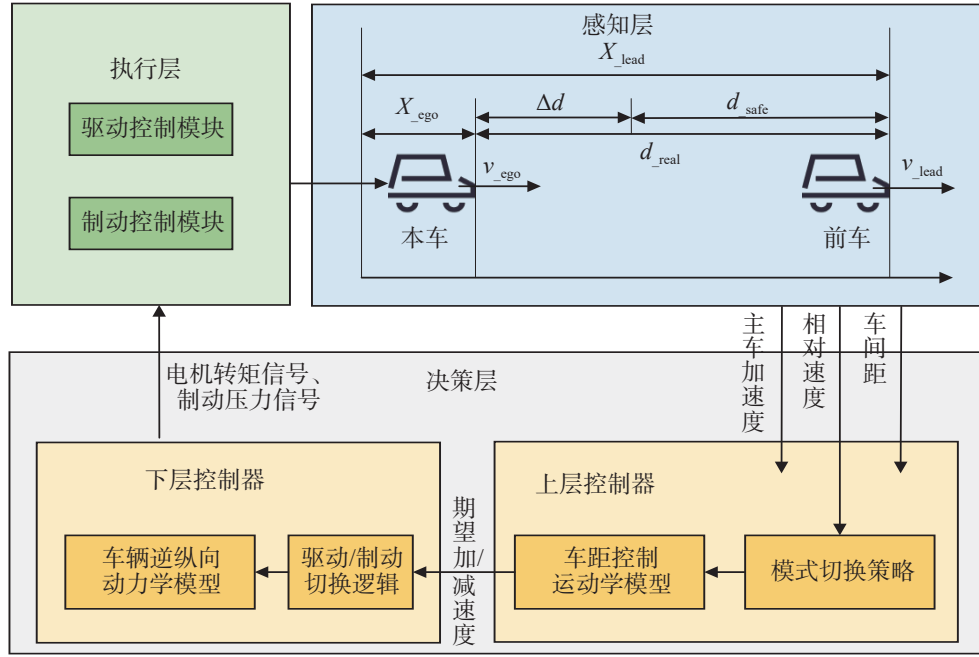


图1 ACC系统分层控制框图

Fig. 1 Block diagram of ACC system hierarchical control

感知层通过雷达传感器探测车辆前方道路有无行驶车辆,根据探测结果采取不同的控制策略,若探测到前方道路有行驶车辆,采取跟车巡航策略,控制车辆在安全车距下行驶;若未探测到前方道路有行驶车辆,采取定速巡航策略,控制车辆按设定的初始速度定速巡航。系统决策层由上层和下层控制器组成,上层控制器通过MPC算法的预测模型,在设定的约束条件下对目标函数进行求解计算,得到车辆当前期望加速度;下层控制器通过动力学模型及切换策略计算得到车辆在此刻跟随前车期望的制动压力和转矩,将其输出至执行层;执行层以此控制车辆跟随前车行驶的加减速和速度,使车辆按设定的速度定速巡航或保持安全车车间距跟车巡航。

1.1 车辆纵向运动学模型

上层控制器根据主车与前车之间的纵向运动学模型进行规划控制,图1中: X_{lead} 为前车行驶时的实际位置; X_{ego} 为本车行驶时的实际位置; v_{lead} 为前车行驶时的速度; v_{ego} 为本车行驶时的速度; d_{real} 为前后两车之间的实际距离; Δd 为前后两车之间的间距误差; d_{safe} 为前后两车行驶时的安全车距。

固定车头时距^[11-12],根据两车的相对运动状态,建立本车与前车状态关系模型,如式(1):

$$\begin{cases} d_{real} = X_{lead} - X_{ego} \\ \Delta d = d_{real} - d_{safe} \\ d_{safe} = d_{default} + t_{gap} v_{ego} \\ v_{relative} = v_{lead} - v_{ego} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_{default}$ 为两车行驶时的最小安全车距; t_{gap} 为固

定车头时距; $v_{relative}$ 为前后两车行驶时的相对车速。

当 $d_{real} \geq d_{safe}$ 时,采用定速巡航模式,控制本车按照设定的初始速度定速行驶;

当 $d_{real} < d_{safe}$ 时,采用跟车巡航模式,控制本车在安全距离下跟踪前车行驶^[13]。

由于控制器存在延迟^[14],上层控制器计算出的车辆期望加速度与车辆实际加速度之间的关系用一阶惯性来表示:

$$a_{ego} = \frac{K_1}{T_1 + 1} a_{desire} \quad (2)$$

式中: a_{ego} 为本车跟随前车行驶的实际加速度; a_{desire} 为本车跟随前车行驶的期望加速度; K_1 为延迟环节系统增益; T_1 为延迟常数。

文中采用前向欧拉法^[15]对本车与前车的状态关系方程进行离散化处理,得到离散的系统时域关系:

$$\begin{cases} \Delta d(k+1) = \Delta d(k) + v_{relative}(k)T_2 + \frac{1}{2}(a_{lead}(k) - a_{ego}(k))T_2^2 \\ v_{relative}(k+1) = v_{relative}(k) + a_{lead}(k)T_2 - a_{ego}(k)T_2 \\ v_{ego}(k+1) = v_{ego}(k) + a_{ego}(k)T_2 \\ a_{ego}(k+1) = (1 - \frac{T_2}{T_1})a_{ego}(k) + \frac{T_2}{T_1}u(k) \\ j_{ego}(k+1) = -\frac{a_{ego}(k)}{T_1} + \frac{u(k)}{T_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u(k)$ 为上层控制算法的输入; j_{ego} 为本车跟随前车时的加速度变化率,将其作为车辆动力学系统的状态扰动量; T_2 为上层控制系统采样时间; k 为第 k 时刻。

将前后两车之间的距离误差 Δd 以及两车行驶的相对车速 v_{relative} 作为系统输出并离散化, 选取 $\mathbf{x}(k) = [\Delta d(k), v_{\text{relative}}(k), v_{\text{ego}}(k), a_{\text{ego}}(k), j_{\text{ego}}(k)]^T$ 作为决策层控制系统的状态变量, 对其进行离散化可得状态空间表达式:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{G}w(k) \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_2 & 0 & -\frac{1}{2}T_2^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -T_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T_2}{T_1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{T_2}{T_1} \\ \frac{1}{T_1} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T_2^2 \\ T_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中: $w = a_{\text{lead}}$, 为前车行驶时的加速度; \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{G} 为控制系统中各种扰动量的系数矩阵。

1.2 车辆控制约束及综合优化

为了保证车辆 ACC 分层控制系统在实际行车过程中能处理遇到的复杂问题, 从安全性、跟随性、舒适性和经济性 4 个方面综合优化车辆的整体性能, 使这 4 个指标达到 1 个最佳的平衡点, 最大程度地提高系统的性能。

1.2.1 安全性

为应对车辆跟随前车行驶时前车紧急刹车等突发情况, 需对两车之间的实际距离设置 1 个最小安全距离阈值, 保证两车之间的实际车距始终 \geq 系统设置的最小安全距离^[16]:

$$d_{\text{real}} = X_{\text{lead}} - X_{\text{ego}} \geq d_{\text{default}} \quad (6)$$

1.2.2 跟随性

车辆平稳地跟随前车行驶是 ACC 系统的 1 个重要需求指标, 在保证两车行驶在安全距离的条件下, 需将两车之间的距离误差和相对速度误差收敛于 0。

$$\begin{cases} \Delta d(k) \rightarrow 0 \\ v_{\text{relative}}(k) \rightarrow 0 \end{cases}, k \rightarrow \infty \quad (7)$$

车辆跟随前车行驶的跟随性能指标为

$$J_1 = \lambda_{\Delta d} \Delta d^2 + \lambda_{v_{\text{relative}}} v_{\text{relative}}^2 \quad (8)$$

式中: $\lambda_{\Delta d}$, $\lambda_{v_{\text{relative}}}$ 分别为车辆跟随性的权重系数。

同样, 为应对因突发路况引起的跟随性能不足, 另外设置硬约束:

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

式中: Δd_{\max} , Δd_{\min} , Δv_{\max} , Δv_{\min} 分别为前后两车间距

误差与车速误差的最大值、最小值。

1.2.3 舒适性

为避免车辆在驾驶过程中加速度及其变化率的突变给驾驶员带来不适感, 提高 ACC 控制系统的舒适性, 设置以下硬约束^[17]:

$$\begin{cases} a_{\text{desire}_{\min}} \leq a_{\text{ego}} \leq a_{\text{desire}_{\max}} \\ a_{\text{desire}_{\min}} \leq a_{\text{desire}} \leq a_{\text{desire}_{\max}} \\ \dot{a}_{\text{desire}_{\min}} \leq \dot{a}_{\text{ego}} \leq \dot{a}_{\text{desire}_{\max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $a_{\text{desire}_{\max}}$, $a_{\text{desire}_{\min}}$, $\dot{a}_{\text{desire}_{\min}}$, $\dot{a}_{\text{desire}_{\max}}$ 分别为车辆跟随前车行驶的期望加速度及加速度变化率的最大值、最小值。

1.2.4 经济性

考虑到在复杂工况下, 车辆跟随前车行驶时会进行频繁地变加速或变减速, 导致电动汽车的电量异常损耗, 为降低能量消耗, 需对车辆的加速度及其变化率进行优化约束:

$$\begin{cases} |a_{\text{ego}}(k)| \rightarrow \min \\ |j_{\text{ego}}(k)| \rightarrow \min \end{cases} \quad (11)$$

车辆跟随前车行驶的经济性能指标为^[18]:

$$J_2 = \lambda_{a_{\text{ego}}} a_{\text{ego}}^2 + \lambda_{j_{\text{ego}}} j_{\text{ego}}^2 \quad (12)$$

式中: $\lambda_{a_{\text{ego}}}$, $\lambda_{j_{\text{ego}}}$ 分别为车辆经济性的权重系数。

ACC 系统综合优化约束条件可汇总为:

$$\begin{cases} d_{\text{real}} > d_{\text{safe}} \\ \Delta d_{\min} \leq \Delta d \leq \Delta d_{\max} \\ \Delta v_{\min} \leq \Delta v \leq \Delta v_{\max} \\ a_{\text{desire}_{\min}} \leq a_{\text{ego}} \leq a_{\text{desire}_{\max}} \\ a_{\text{desire}_{\min}} \leq a_{\text{desire}} \leq a_{\text{desire}_{\max}} \\ \dot{a}_{\text{desire}_{\min}} \leq \dot{a}_{\text{ego}} \leq \dot{a}_{\text{desire}_{\max}} \end{cases} \quad (13)$$

针对实际行车过程, 设计综合控制函数对上述 4 种需求指标进行优化, 确保 ACC 系统在各种情况下都能表现良好。定义 $\mathbf{x}(k) = [\Delta d(k), v_{\text{relative}}(k), v_{\text{ego}}(k), a_{\text{ego}}(k), j_{\text{ego}}(k)]^T$ 为决策层控制系统的状态变量, 设综合控制函数为 J ^[19], 如式 (14)。

$$J = \mathbf{x}^T \lambda_x \mathbf{x} + \lambda_{v_{\text{relative}}} v_{\text{relative}}^2 \quad (14)$$

式中: $\lambda_x = \begin{bmatrix} w_{\Delta d} & 0 & 0 \\ 0 & w_{v_{\text{relative}}} & 0 \\ 0 & 0 & a_{\text{ego}} \end{bmatrix}$, 为权重矩阵。

2 分层控制器的设计

2.1 上层控制器

为解决多目标优化问题, 基于车辆相互纵向运动学模型, 选用 MPC 分层控制算法设计自适应巡航上层控制器, 对系统状态的预测方程进行离散化可得:

$$\hat{\mathbf{X}}_p(k+p|k) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{U}(k+m) + \bar{\mathbf{G}}\mathbf{W}(k+p) + \bar{\mathbf{H}}\mathbf{e}_x(k) \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{Y}}_p(k+p|k) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{D}}\mathbf{U}(k+m) + \bar{\mathbf{E}}\mathbf{W}(k+p) + \bar{\mathbf{F}}\mathbf{e}_x(k) - \bar{\mathbf{Z}} \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_p(k+p|k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_p(k+1|k) \\ \hat{x}_p(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{x}_p(k+p|k) \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{Y}}_p(k+p|k) = \begin{bmatrix} \hat{y}_p(k+1|k) \\ \hat{y}_p(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_p(k+p|k) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U}(k+m) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+m-1) \end{bmatrix}; \mathbf{W}(k+p) = \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+p-1) \end{bmatrix}。$$

式中: p, m 分别为 MPC 控制算法^[20]的预测时域和控制时域; $\hat{\mathbf{X}}_p(k+p|k)$ 为第 k 时刻 MPC 对未来 p 时刻方程状态变量的预测量; $\hat{\mathbf{Y}}_p(k+p|k)$ 为第 k 时刻 MPC 对未来 p 时刻输出向量的预测量; $\mathbf{U}(k+m)$ 为待求解序列矩阵; $\mathbf{W}(k+p)$ 为 p 时刻的系统误差系数矩阵; $\mathbf{e}_x(k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}_m(k|k-1)$, 为传感器观测值与实际值的误差。各个预测矩阵为:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}^p \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{AB} & \mathbf{B} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B} & \mathbf{A}^{p-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{A}^{p-m}\mathbf{B} \end{bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{AG} & \mathbf{G} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{G} & \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{G} & \dots & \mathbf{G} \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_p \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^p \end{bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mathbf{CA}^{p-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{CA}^{p-m}\mathbf{B} \end{bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \mathbf{CG} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CAG} & \mathbf{CG} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mathbf{CA}^{p-1}\mathbf{G} & \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{G} & \dots & \mathbf{CG} \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \mathbf{CH}_1 \\ \mathbf{CH}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{CH}_p \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z} \\ \mathbf{Z} \\ \vdots \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix}。$$

由于传感器自身的局限, 测量前车加速度相对延迟, 但计算步长较小。可通过上一时刻两车相对速度及本车加速度计算得到上一时刻的前车加速度, 即系统误差系数矩阵 $\mathbf{W}(k+p)$ 计算过程为:

$$\hat{w}(k-1|k) = \frac{v_{\text{relative}}(k) - v_{\text{relative}}(k-1)}{T_s} + a_{\text{ego}}(k-1) \quad (17)$$

$$w(k) = \hat{w}(k-1|k) \quad (18)$$

$$w(k+i) = w(k), \quad i = 1, 2, \dots, p-1 \quad (19)$$

$$\mathbf{W}(k+p) = \begin{bmatrix} w(k) \\ w(k+1) \\ \vdots \\ w(k+p-1) \end{bmatrix} \quad (20)$$

将车辆行驶过程中多个性能指标进行加权整理成综合控制需求函数:

$$J = \sum_{i=1}^p [\hat{\mathbf{Y}}_p(k+i|k) - Y(k+i)]^T \mathbf{Q} [\hat{\mathbf{Y}}_p(k+i|k) - Y(k+i)] + \sum_{i=0}^{m-1} \mathbf{U}(k+i)^T \mathbf{R} \mathbf{U}(k+i) \quad (21)$$

式中: $Y(k+i)$ 为控制输出参考值; \mathbf{Q}, \mathbf{R} 分别为综合控制需求函数的权重矩阵。

将式 (16) 代入式 (21), 化简整理可得:

$$J = 2\{\mathbf{x}^T(k)\bar{\mathbf{C}}^T[1-\bar{\boldsymbol{\varphi}}^T]\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{D}} + \mathbf{W}(k+p)^T\bar{\mathbf{E}}^T\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{D}} - \bar{\mathbf{Z}}^T[1-\bar{\boldsymbol{\varphi}}^T]\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{D}} + \mathbf{e}_x(k)^T\bar{\mathbf{F}}^T\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{D}}\}\mathbf{U}(k+m)^T(\bar{\mathbf{R}} + \bar{\mathbf{D}}^T\bar{\mathbf{Q}}\bar{\mathbf{D}})\mathbf{U}(k+m) \quad (22)$$

$$\bar{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{Q} \end{bmatrix}; \bar{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{R} \end{bmatrix}; \bar{\boldsymbol{\varphi}} = \begin{bmatrix} \varphi^1 \\ \varphi^2 \\ \vdots \\ \varphi^p \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $\bar{\mathbf{Q}}$ 为跟车性权重矩阵; $\bar{\mathbf{R}}$ 为舒适性权重矩阵; $\bar{\boldsymbol{\varphi}}$ 为控制输出权重矩阵。

最终, 上层控制器在兼顾车辆安全性、跟随性、舒适性、经济性 4 个指标综合优化控制的同时, 通过 MPC 算法将 k 时刻获取的最佳控制序列的首个控制信息 $u(k)$ 作为实际控制输入给上层控制器。当到下一个时刻 $k+1$ 时, 重复上述过程, 实现在线滚动优化控制, 得到车辆每一时刻的期望加速度。

2.2 下层控制器

下层控制器是 ACC 自适应巡航系统的决策层, 上层控制器通过模型预测算法计算出车辆跟随前车时的期望加速度; 下层控制器根据建立的逆车辆动力学模型、驱动电机模型和制动模型计算得到跟随前车所需的驱动电机转矩/制动压力, 将其输送给执行层实现车辆加速度和速度的调整。

2.2.1 无刷直流电机控制器

在电动汽车加减速行驶过程中, 驱动电机对 ACC 下层控制器的驱动/制动至关重要^[21]。驱动电机根据电机控制器传送的输出信号产生期望转矩, 实现车辆自适应巡航的驱动/制动。文中采用无刷直流电机, 其等效电路如图 2。图中: V_a, V_b, V_c 为三相输出电压; i_a, i_b, i_c 为三相定子电流; Ω 为每相电阻; $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ 为三相反向电动势; L 为绕组自感与绕组互感之差。

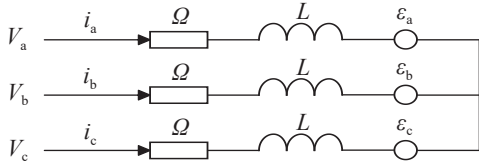


图2 无刷直流电机等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of brushless DC motor

根据等效电路, 可得三相绕组电压平衡方程:

$$V = 2I\Omega + 2L\dot{I} + 2\varepsilon_a \quad (24)$$

其中: $i_a = -i_b = I$; \dot{I} 为电流变化率。

无刷电机的基本特性描述如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= -\varepsilon_b = \kappa\omega \\ T_{\text{out}} &= \frac{P}{\omega} = \frac{\varepsilon_a i_a + \varepsilon_b i_b}{\omega} = 2\kappa I \\ J_{\text{bldc}} \frac{d\omega}{dt} &= T_{\text{out}} - T_{\text{load}} \end{aligned} \quad (25)$$

式中: κ 为逆电动势系数; P 为电机的额定功率; ω 为电机的角速度; J_{bldc} , T_{out} , T_{load} 分别为电机的转动惯量、输出转矩、负载转矩。

2.2.2 车辆行驶驱动/制动系统

电动汽车在行驶过程中会受到各种阻力, 主要为滚动、坡道、加速、空气阻力^[22]等, 行驶方程式为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (26)$$

式中: F 为汽车驱动力; F_1, F_2, F_3, F_4 分别为滚动、空气、坡度以及加速阻力; m 为整车质量; g 为重力加速度; τ 为传动系统的总传动比; η 为传动系统效率; l 为车轮半径; S 为整车迎风面积; f 为滚动阻力系数; f' 为空气阻力系数; θ 为坡度角; δ 为旋转质量换算系数。

将式 (26) 变换可得期望的电机输出转矩:

$$T_{\text{out}} = \frac{l}{\tau\eta} \left(mgf \cos \theta + \frac{f'Sv_{\text{ego}}^2}{21.15} + mg \sin \theta + \delta ma_{\text{ego}} \right) \quad (27)$$

电动汽车通过增加制动管路压力来提高制动压力, 再通过轮缸、制动盘传递至轮胎而产生相应的制动力, 制动压力同样可根据行驶方程推导:

$$ma_{\text{ego}} = F - F_{\text{desire}} - (F_1 + F_2 + F_3) \quad (28)$$

$$F_{\text{desire}} = \frac{-ma_{\text{ego}} - \frac{f'Sv_{\text{ego}}^2}{21.15} - mg(f \cos \theta + \sin \theta)}{\mu_{\text{desire}}} \quad (29)$$

式中: F_{desire} 为期望制动力; F_{desire} 为期望制动压力; μ_{desire} 为期望制动力与期望制动压力的比值。

2.2.3 驱动与制动切换策略

执行层主要通过下层控制器输出的电机压力和制动压力信号, 改变车辆跟随前车行驶所需的期望电机转矩和管路压力, 通过调整车辆的纵向加速度

来跟踪前车行驶。为使车辆行驶过程中合理切换驱动和制动踏板, 避免因频繁操作踏板而损坏机械部件, 需优化执行层中的驱动/制动策略, 提高车辆行驶的经济性和舒适性。对于车辆驱动/制动切换曲线, 设置 1 个阈值, 使车辆在控制过程中有一定的过渡范围。

利用 CarSim 软件自带的车辆模型作为参照, 将车辆的节气门开度设置为最低, 依靠行驶过程中的各种阻力使车辆从 150 km/h 高速行驶状态缓慢减速到 0, 得到车辆速度-加速度变化曲线。在此变化曲线的上下范围取 1 个阈值作为切换策略的过渡区域, 阈值不能过大或过低, 过大会使车辆驱动/制动不及时, 导致安全距离变小而引发追尾; 过小会使驱动/制动太容易, 导致频繁切换踏板, 致使机械部件损耗且影响乘坐舒适性。文中选取 0.1 m/s^2 为切换策略的阈值^[23], 改进后的执行层切换策略如图 3。

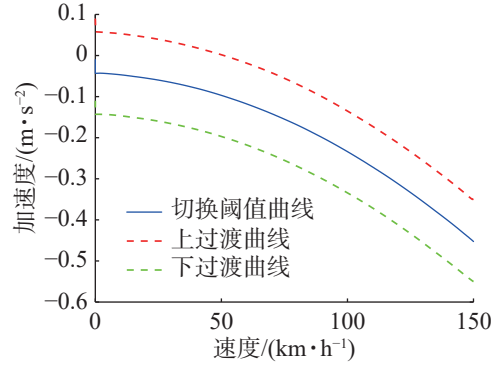


图3 驱动/制动模式切换策略

Fig. 3 Switching strategy of driving/braking mode

设 a_{desire} 为 MPC 分层控制上层输出的期望加速度, 根据图 3 切换曲线可得:

当 $a_{\text{desire}}(0) - \Delta h \leq a_{\text{desire}} \leq a_{\text{desire}}(0) + \Delta h$ 时, 执行层对车辆不进行驱动/制动控制;

当 $a_{\text{desire}} > a_{\text{desire}}(0) + \Delta h$ 时, 执行层对车辆进行驱动控制;

当 $a_{\text{desire}} < a_{\text{desire}}(0) - \Delta h$ 时, 执行层对车辆进行制动控制。

3 典型工况仿真分析

在 CarSim/Simulink 中对 MPC 分层控制的自适应巡航策略进行有效性仿真实验, 选取定速巡航、跟车巡航、紧急制动以及复杂工况作为车辆跟随前车的仿真工况, 对比分析车辆与目标车辆(前车)行驶过程中的速度、加速度以及车距等重要参数, 验证 ACC 控制策略在车辆跟随目标时是否满足设计要求。

3.1 定速巡航工况

定速巡航指当车载传感器未检测到前方道路有

行驶车辆,车辆按照系统设定的速度定速行驶。为验证车辆能否安全、舒适且快速稳定地跟踪设定的初始巡航速度,对车辆进行定速巡航仿真实验。设车辆初始速度为 5, 10, 15 m/s, 初始巡航速度为 30 m/s, 车辆定速巡航加速度区间为 $-3\sim 3\text{ m/s}^2$, 车辆行驶时的最小安全车距 d_{default} 为 10 m。定速巡航仿真实验结果如图 4。

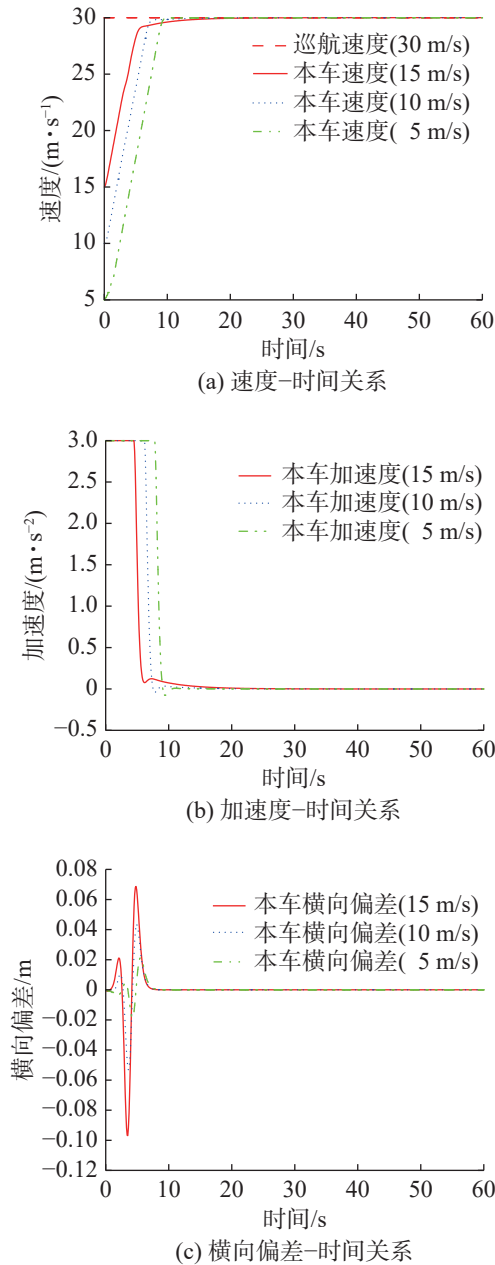


图4 定速巡航工况仿真结果

Fig. 4 Simulation result of cruise control condition

由图 4 可知:开始时,车辆分别以初始速度为 5, 10, 15 m/s 行驶,速度远远小于设定的巡航速度;在 0~10 s 内,控制系统快速响应,加速度快速增至 3 m/s^2 , 速度增加至巡航速度且横向偏差逐渐收敛于 0, 车辆稳定且精准地跟踪巡航速度。由此表明,在定速

巡航工况下采用 ACC 控制策略可稳定控制车速,达到设计要求。

3.2 跟车巡航工况

跟车巡航指车载传感器检测到前方道路有行驶车辆,车辆按照系统设定的速度进行跟车巡航,期间车辆会自动调节跟随车速,使车距始终保持在安全车距范围。设置前车位置在距离本车 40 m 处的道路,前车初始速度为 25 m/s,加速度为正弦函数曲线,幅值为 $-0.6\sim 0.6\text{ m/s}^2$;周期时间为 60 s,频率为 0.2,本车以 10, 15, 20 m/s 的初始速度跟车行驶,巡航速度为 30 m/s,跟车巡航加速度区间为 $-3\sim 3\text{ m/s}^2$ 。跟车巡航仿真实验结果如图 5。

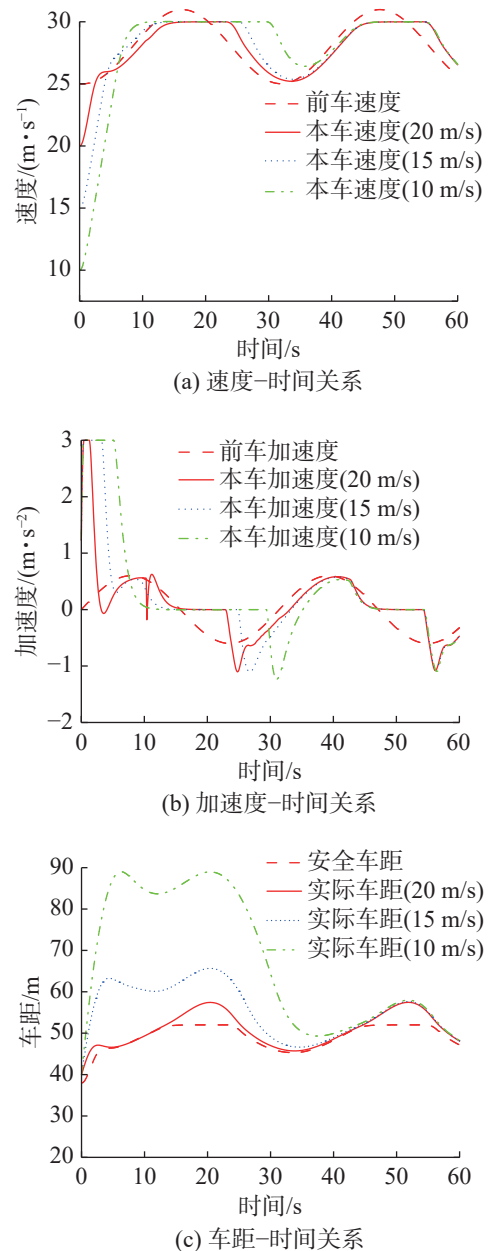


图5 跟车巡航工况仿真结果

Fig. 5 Simulation result of follow the car cruise condition

由图 5 可知: 本车以不同的初始速度跟车巡航只影响巡航的初始阶段, 对本车跟踪上前车后的速度、加速度以及两车间的实际车距没有影响, 变化曲线逐渐保持一致; 在 0~2 s 内, 本车以不同的初始速度出发, 为达到设定的巡航速度, 加速度迅速增至 3 m/s^2 ; 在 >2~15 s 内, 在加速跟车的同时保持行车安全性, 不同初始速度相继开始减加速, 初始速度 20 m/s 时 2 s 后开始减加速、初始速度 15 m/s 时 3 s 后开始减加速、初始速度 10 m/s 时 5 s 后开始减加速, 3 种不同状态在 15 s 内相继加速至巡航车速, 此时的实际车距保持在安全车距范围; 在 >15~20 s 内, 前车行驶速度大于设定的巡航速度且两车之间的距离大于安全车距, 本车采取 30 m/s 定速巡航模式行驶; 在 >20~30 s 内, 随前车缓慢减速, 两车之间的实际车距逐渐收敛于安全车距, 初始速度 20, 15 m/s 时, 本车采取跟车巡航模式跟随前车行驶, 而初始速度 10 m/s 时实际车距与安全车距存在较大偏差, 故继续采取定速巡航模式跟随前车, 两车之间的车距误差逐渐收敛于 0, 开始采取跟车巡航模式; 在 >30~60 s 内, 前车加速度呈周期性改变, 且本车已跟踪上前车, 在保证安全车距的同时, 3 种不同状态的速度、加速度及两车实际车距变化逐渐保持一致。

3.3 紧急制动工况

自适应巡航系统在实际行驶过程中, 需具备紧急制动响应, 当前车因突发状况紧急刹车时, 本车能够迅速做出反应避免发生追尾事故。为验证 ACC 控制策略在前车紧急制动下的表现情况, 设置 2 种状态进行仿真实验, 分析加速和匀速跟车情况下前车紧急制动时本车的响应。初始状态①: 设置前车在距离本车 40 m 处的道路上, 在 0~10 s 内先保持 25 m/s 匀速行驶; 初始状态②: 设置前车在距离本车 38 m 处的道路上, 在 0~10 s 内先保持 20 m/s 匀速行驶。2 种状态下, 设置本车初始速度为 25 m/s, 在 10~15 s 内, 因前车突发状况本车以 -3 m/s^2 的减加速度开始减速, >15 s 再以 1 m/s^2 的加速度加速行驶。紧急制动仿真实验结果如图 6。

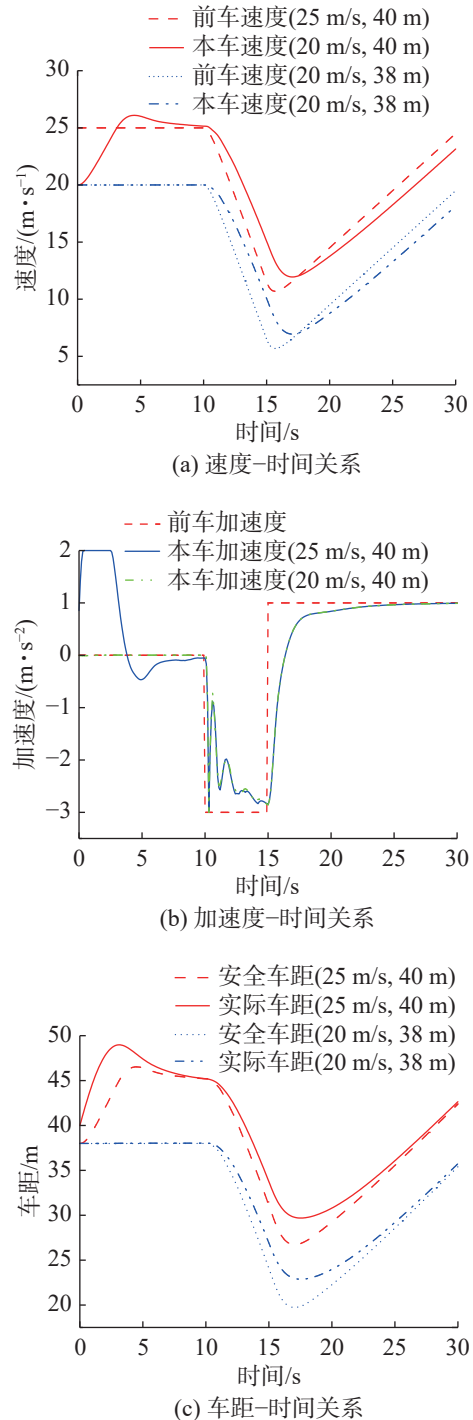


图6 紧急制动工况的仿真结果

Fig. 6 Simulation result of emergency braking condition

由图 6 可知: 对于初始状态①, 在 0~5 s 内, 本车为达到设定的巡航速度, 加速度增至 2 m/s^2 开始加速跟车行驶; 在 >5~10 s 内, 本车速度超过前车速度, 为保持安全车距, 本车开始减速至 25 m/s 跟车行驶; 在 >10~15 s 内, 因前车突然减速, 为保持安全车距, 本车迅速做出减速反应, 此时速度与车距变化规律基本保持一致, 且实际距离始终大于安全车距; 在 >15 s 时, 本车开始加速, 稳定跟随前车行驶。对

于初始状态②,在 0~10 s 内,本车匀速跟随前车行驶,实际车距与安全车距变化一致;>20 s 时,前车突发减速再加速,本车依旧能够迅速做出反应,将车距和速度控制在预期范围。结果显示,在前车紧急制动情况下,ACC 控制策略能够使车辆快速响应紧急制动,与前车保持良好车距,避免追尾事故发生。

3.4 复杂工况

在 CarSim 软件中设置 1 条由直线和连续弯道组成的路段进行仿真实验。路段总长为 1 000 m,初始和终点位置分别为 (40 m, -30 m) 和 (1 000 m, -250 m)。设置前车位置在距离本车 50 m 处的前方道路上,本车跟随前车均以 72 km/h 的速度行驶,在仿真期间的 60 s 内,前车经历多次变加速、变减速和匀速运动,前 38 s 内前车以 72 km/h 变加速、变减速行驶,期间最高速度达到 85 km/h、最低速度 50 km/h;38 s 后有一段 5 s 的匀速行驶,速度为 60 km/h,匀速行驶后再进行变加速行驶,速度最高达 85 km/h,直到仿真最后的 10 s 内,前车从最高速度缓慢减到 5 km/h。复杂工况仿真结果如图 7。

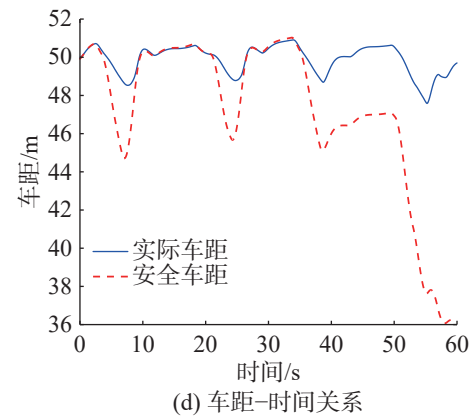
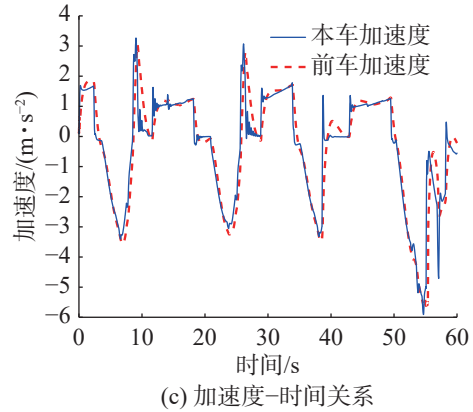
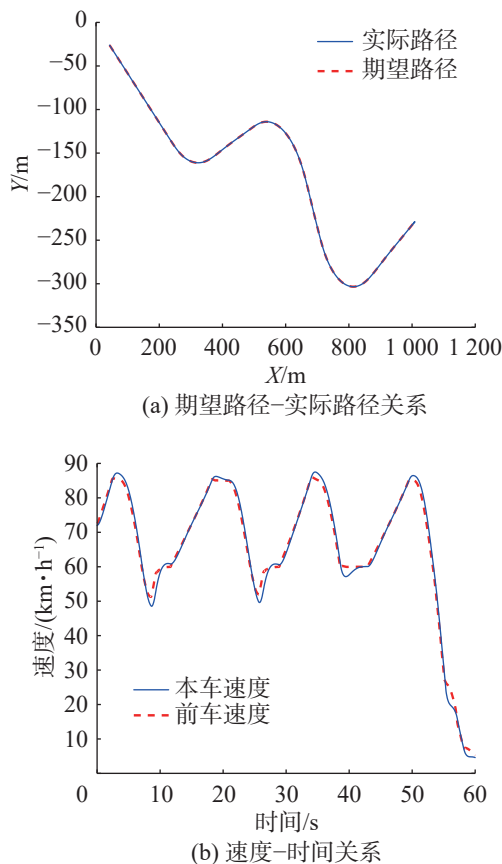


图7 复杂工况的仿真结果

Fig. 7 Simulation result of complex working condition

在 0~60 s 内的行车过程中,从图 7(a), (b) 可看出 ACC 控制策略可较好地控制本车沿着期望路径行驶并平稳地跟踪前车;从图 7(b), (c) 可看出前车与本车均以初始速度为 72 km/h 的速度行驶,前车经历多次加减速及匀速行驶,本车均能稳定地跟踪前车且两车均保持极其相似的速度变化趋势,相位差很小,说明该控制策略的控制精度高、控制响应快。从图 7(d) 可看出:0 s 时两车相距 50 m,期间经历多次变速和弯道行驶,本车均能平稳地跟随前车,将车距很好地控制在安全车距范围;在 50~60 s 内,本车跟随前车从最高速度 85 km/h 缓慢减至 5 km/h;为保持车距加速度在 50~55 s 内最低达到 -6 m/s^2 ,相对距离达到 41 m,即在安全车距范围,在 >55~60 s 内,本车缓慢减速直到速度为 5 km/h,此时本车与前车保持 49 m 的相对距离。在整个工况中无论是直线路段还是弯曲路段,提出的 ACC 控制策略都能使本车稳定地跟踪前车,且能保持良好的安全距离,满足车辆跟随性和行车安全性、舒适性的要求。

4 结论

基于 MPC 分层控制提出 1 种车辆自适应巡航

策略, 并根据同一车道中两车间距和相对速度保证安全车间距。根据主车与前车之间的运动学关系, 建立基于 MPC 算法的 ACC 上层控制器; 选取安全性、跟随性、舒适性、经济性 4 个性能指标作为车辆控制的主要需求, 对系统的整体性能进行综合优化; 建立车辆逆纵向动力学模型, 设计 ACC 下层控制器中的驱动电机和制动模型, 制定驱动与制动切换策略, 最后在 CarSim/Simulink 中针对 4 种典型工况进行仿真验证。结果表明: 在定速巡航与跟车巡航工况下, 车辆能够快速稳定地跟随设定的初始速度行驶, 且与前车始终保持安全车距, 车辆的速度、加速度变化相对平稳, 可保证行车的舒适性; 在紧急制动工况下, 车辆能够迅速做出减速反应, 并控制车距在安全范围内平稳跟踪前车; 在复杂工况下, 跟车巡航能将误差快速消除, 并控制车辆在直线和弯曲路段平稳跟随前车, 保证车距误差较小, 有效实现车辆跟随的快速动态响应。在整个工况中无论是直线路段还是弯曲路段, 提出的车辆自适应巡航策略都能使车辆稳定跟踪前车, 且保持良好的安全距离。该策略具有良好的鲁棒性和适应性, 能够满足 ACC 系统功能的设计要求。

参考文献:

- [1] XU L, HE B B, ZHOU H C, et al. Impact and revolution on law on road traffic safety by autonomous driving technology in China[J]. *Computer Law & Security Review*, 2023, 51:105906.
- [2] 崔胜民. 汽车性能建模与仿真[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
CUI S M *Automotive Performance Modeling and Simulation* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- [3] 张丽萍, 刘猛, 刘志刚, 等. 车辆自适应巡航分层控制系统的联合仿真研究[J]. *机械设计与制造*, 2022(5):69-72,77.
ZHANG L P, LIU M, LIU Z G, et al. Joint simulation of vehicle adaptive cruise hierarchical control system[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022(5):69-72,77.
- [4] 张义奇, 牛礼民, 朱奋田. 基于 LQR 的车道保持辅助控制策略[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(1):43-52.
ZHANG Y Q, NIU L M, ZHU F T. Control strategy of lane keeping assistant based on LQR[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2022, 39(1):43-52.
- [5] TIAN Z F, LIU L K, SHI W S. A pulse-and-glide-driven adaptive cruise control system for electric vehicle[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(11):e13054.
- [6] 苑风霞, 张华, 陈丰, 等. 基于模型预测控制的汽车自适应巡航分层控制[J]. *淮北师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(4):57-63.
YUAN F X, ZHANG H, CHEN F, et al. Hierarchical control of vehicle adaptive cruise based model predictive control[J]. *Journal of Huaibei Normal University (Natural Sciences)*, 2021, 42(4):57-63.
- [7] 周亚洲, 汪若尘, 丁仁凯. 汽车自适应巡航与换道过程多目标协同控制[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3):108-115.
ZHOU Y Z, WANG R C, DING R K. Multi-objective coordinated control for vehicle during adaptive cruise and lane change process[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(3):108-115.
- [8] SHAKOURI P, ORDYS A. Nonlinear Model Predictive Control approach in design of Adaptive Cruise Control with automated switching to cruise control[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 26:160-177.
- [9] 冷姚, 赵树恩. 智能车辆多模式自适应巡航控制研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2020, 34(9):73-81.
LENG Y, ZHAO S E. Adaptive cruise control with multi-mode strategy of intelligent vehicle[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2020, 34(9):73-81.
- [10] 刘西, 明朗, 胡远志. 基于 MPC 算法的车辆自适应巡航系统分层控制研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(3):53-60.
LIU X, MING L, HU Y Z. Research on hierarchical control of vehicle adaptive cruise system based on MPC algorithm[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(3):53-60.
- [11] 刘文祥. 基于 MPC 自适应巡航系统控制策略联合仿真研究[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2020.
LIU W X. Joint simulation study on control strategy of MPC adaptive cruise control system [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2020.
- [12] 宋家成, 闫茂德, 杨盼盼, 等. 基于数据驱动的鲁棒反步自适应巡航控制[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(3):485-493.
SONG J C, YAN M D, YANG P P, et al. Robust backstepping adaptive cruise control based on data-driven[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(3):485-493.
- [13] ANAND S, OHOL S S. Modelling and simulation of adaptive cruise control and overtake assist system[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72:1353-1360.
- [14] LIU M C, CHEN W, HUANG J H, et al. Kalman filter-based model predictive control for an adaptive cruise control system considering measurement noise[J]. *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, 2020(3):53-66.

- workshop[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2017.
- [13] 于青玉, 袁子洲, 高飞. 空气幕在消失模铸造浇注工位除尘上的应用[J]. 铸造技术, 2014, 35(7):1562-1564.
YU Q Y, YUAN Z Z, GAO F. Application of air curtain in dust elimination in EPC casting[J]. Foundry Technology, 2014, 35(7):1562-1564.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 工作场所有害因素职业接触限值: GBZ 2—2002[S]. 北京: 法律出版社, 2004.
Ministry of Health, People's Republic of China. Occupational Exposure Limits for Hazardous Agents in Workplace Air: GBZ 2—2002 [S]. Beijing: Law Press, 2004.
- [15] 蒋仲安, 邓权龙, 时训先, 等. 石棉筛分车间粉尘质量浓度分布规律的数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(12):135-141.
JIANG Z A, DENG Q L, SHI X X, et al. Numerical simulation of dust mass concentration distribution in screening workshop of asbestos concentrator[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(12): 135-141.
- [16] 刘茜尧, 连清旺. 选煤厂筛分车间粉尘浓度分布规律数值研究[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(1):37-41.
LIU X Y, LIAN Q W. Numerical study on dust concentration distribution in screening workshop of coal preparation plant[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(1):37-41.
- [17] 林浩宇, 蒋仲安, 杨斌, 等. 组合式通风打磨台风量对粉尘控制效果的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11):160-165.
LIN H Y, JIANG Z A, YANG B, et al. Influence of air volume on dust control effect for combined ventilation grinding table[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(11):160-165.
- [18] 丁厚成, 李胜男, 郭成, 等. 综采工作面双重空气幕隔尘技术数值模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(3): 119-124.
DING H C, LI S N, GUO C, et al. Numerical simulation study on the dust isolation technology of double air curtains at fully-mechanized work face[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(3):119-124.
- [19] LI X C, ZHAO X L, JIANG Y F, et al. Air curtain dust-collecting technology: influence factors for air curtain performance[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 218:104780.
- [20] NIE W, ZHANG Y L, GUO L D, et al. Research on airborne air curtain dust control technology and air volume optimization[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 172:113-123.
- [21] XIU Z H, NIE W, CAI P, et al. Partially enclosed air curtain dust control technology to prevent pollution in a fully mechanized mining face[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5):108326.

责任编辑: 闫芳芳

(上接第 45 页)

- [15] 陈威. 基于模型预测控制的智能汽车自适应巡航控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
CHEN W. Research on Adaptive Cruise Control of Intelligent Vehicles Based on Model Predictive Control [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [16] 邓国红, 张熏, 宋红松, 等. 协同自适应巡航控制系统跟车算法设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(12):32-37.
DENG G H, ZHANG X, SONG H S, et al. Design of car-following algorithms for cooperative adaptive cruise control system[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(12):32-37.
- [17] ALTHOFF M, MAIERHOFER S, PEK C. Provably-correct and comfortable adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, 6(1):159-174.
- [18] 党睿娜, 李升波, 王建强, 等. 兼顾节能与安全的电动车 ACC 系统[J]. 汽车工程, 2012, 34(5):379-384.
DANG R N, LI S B, WANG J Q, et al. Adaptive cruise control system of electric vehicles considering both economy and safety[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(5):379-384.
- [19] 何文韬, 何德峰, 崔靖龙, 等. 网联车辆自适应巡航控制算法验证平台设计[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(14): 235-241.
HE W T, HE D F, CUI J L, et al. Design of verification platform for adaptive cruise control algorithm of connected vehicles[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(14):235-241.
- [20] LI Z T, ZHAO X X, YANG J, et al. Model predictive control of multi-objective adaptive cruise system based on extension theory[Z]. Complex Engineering Systems, 2009.
- [21] LIU X L, ZHU S P, WU Z J. Dynamic modeling and acceleration control of electric vehicles[J]. Advanced Materials Research, 2012, 476/477/478:944-948.
- [22] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
YU Z S. Automotive Theory[M]. 6th edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.
- [23] 岳川元. 智能车辆全速 ACC 纵向 MPC 控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
YUE C Y. Research on Longitudinal MPC Control Method for Full Speed ACC of Intelligent Vehicles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

责任编辑: 何莉