

# 基于 MPC 自适应巡航系统控制策略联合仿真研究

刘文祥,李 强

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

**摘 要:** 为了提高自适应巡航系统的鲁棒性和对复杂跟车环境的适用性,提出一种基于模型预测控制(model predictive control,MPC)的自适应巡航系统分层控制策略。上层控制策略主要考虑速度控制模式和距离控制模式之间的切换,下层控制策略则基于 MPC 理论而提出,确定汽车加速、减速或保持当前车速,以提升系统跟随性。在 Carsim 软件中选取有防抱死制动系统的 C 级掀背车,实时模拟两车(前车和本车)跟随的运行过程。在 MATLAB/Simulink 中建立纵向运动学模型,运用 MPC 控制策略对车辆的跟车工况进行联合仿真。结果表明,我们设计的 MPC 控制器与 PID(proportional-integral-derivative,比例-积分-微分)控制器相比,在跟车工况下本车的加速度峰差值仅为  $1.65\text{ m/s}^2$ ,加速度变化均值降低约 23%,提高了驾驶的舒适性和行驶的稳定性的同时车车间距误差范围控制在  $-0.5\sim 7.3\text{ m}$ ,均值误差降低约 12%,在实际跟车环境中,能有效减少追尾、加塞等情况的发生。

**关键词:** 自适应巡航;模型预测控制;联合仿真;分层控制策略

**中图分类号:** U463.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-8798(2020)04-0313-08

## Co-simulation study on control strategy of adaptive cruise control system based on model predictive control

LIU Wenxiang, LI Qiang

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** To improve the robustness and applicability of the adaptive cruise control system under complex car following environments, a hierarchical control strategy was proposed for the adaptive cruise control system on the basis of model predictive control (MPC). The upper level control strategy mainly catered to the switching between speed control mode and distance control mode, while the lower control strategy was based on MPC theory, which determines whether the home car accelerates or decelerates, or maintains the current speed to enhance

**收稿日期:** 2020-05-17

**基金项目:** 浙江省自然科学基金项目(LY13E050023)

**通信作者:** 李 强(1979— ),男,江苏省溧阳人,教授,博士,主要从事新能源汽车机电一体化控制研究。E-mail: liqiang@zust.edu.cn。

system following performance. The C-Class hatchback, equipped with anti-lock braking system, was selected in the Carsim software to simulate in real time the running process with two cars (front and home) following performance. The longitudinal dynamics model and the corresponding control strategy were established in MATLAB/Simulink, performing the co-simulation of the vehicle under car following conditions by virtue of MPC control strategy. Simulation results show that the peak acceleration difference between the designed MPC controller and the PID (proportional integral derivative) controller is only  $1.65\text{ m/s}^2$  under car following conditions of the vehicle, while the mean acceleration variation is reduced by approximately 23%, improving driving comfort and stability. Moreover, the following distance error range is controlled from  $-0.5\text{ m}$  to  $7.3\text{ m}$ , while the mean error reduced by about 12%. Thus, in the actual car following environment, the probability of tailgating and congestion can be effectively lessened.

**Keywords:** adaptive cruise control; model predictive control; co-simulation; hierarchical control strategy

自适应巡航(adaptive cruise control, ACC)系统作为先进驾驶员辅助系统(advanced driver assistance systems, ADAS)的关键技术之一,可降低驾驶员人为原因导致的事故概率,提高行驶安全性<sup>[1-2]</sup>。根据美国交通运输部门统计数据,在交通运输中使用 ACC 系统,在高速公路上行驶的车辆接近减速状态的前车时,追尾发生率可降低 15% 以上;在超车、换道等常见情况中也能有效降低事故发生的概率<sup>[3-4]</sup>。在汽车智能化、网联化、电动化的大趋势下,ADAS 带来的舒适、安全的驾驶体验被越来越多的消费者所接受,市场应用比例逐年上升。

国内外科研院校对 ACC 系统开展了富有成效的研究。Stanley 等<sup>[5]</sup>运用了较为简化的 PI(proportional-integral, 比例-积分)进行自适应巡航控制研究。Shakouri 等<sup>[6]</sup>分别设计了增益调度的 PI 和线性二次型调节(linear quadratic regulator, LQR)两种控制器来控制节气门开度,其中 LQR 依赖于准确的模型,当模型失配时会导致控制器性能退化。张炳力等<sup>[7]</sup>提出了分层自适应巡航系统的控制策略,充分考虑了各层模式间相互切换策略的优化。王文颢等<sup>[8]</sup>提出了基于深度强化学习的协同式自适应巡航控制策略,对车辆的控制效果有较大提升,但算法编写复杂,实时应用存在一定难度。李世豪等<sup>[9]</sup>和李肖含<sup>[10]</sup>均提出了基于模糊 PID 控制的自适应巡航控制策略,该策略在简单路况下控制效果较好,但在复杂路况下控制效果难以保证。虽然 PID 控制应用简便、广泛,但控制器参数值不能随路况及时调整,即使可通过加入逻辑模糊工具箱来实时调整参数值从而改善 PID 控制性能,也由于模糊规则是根据驾驶者经验制定,缺乏定量的评价方法。基于上述情况,本文提出了一种基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的自适应巡航系统分层控制策略,利用 MPC 滚动优化的特点来提升 ACC 系统的控制效果,以提高其鲁棒性和对复杂跟车环境的适用性。

1 ACC 系统控制策略设计

具有 ACC 系统的车辆可按驾驶员设定的车速行驶并与前车保持一定的安全距离,其速度和距离控制模式如图 1 所示。汽车前端的雷达传感器可测出与同车道行驶前车的距离,当相对距离小于安全距离时,距离控制模式将会启动,本车减速以保持与前车的安全距离  $d_{\text{safe}}$ ,即控制相对距离  $d_{\text{relative}}$  与安全距离保持一致;当相对距离大于安全距离时,速度控制模式则被启动,本车加速至驾驶员设定车速  $v_{\text{set}}$  并保持当前车速,即控制本车速度  $v_{\text{ego}}$  与驾驶员设定速度保持一致。

1.1 设计要求分析

ACC 系统应满足本车稳定跟随前车行驶的要求,车间距过大不仅会降低道路利用率,而且容易导致临近车道的车辆频繁驶入本车道;车间距过小则增加了追尾碰撞的可能性,造成驾驶员心理紧张<sup>[11-12]</sup>。跟随性主要表现在车间距跟随和前车速度跟随两方面,即安全车间距跟随和理想速度跟随。主要控制目标如下:

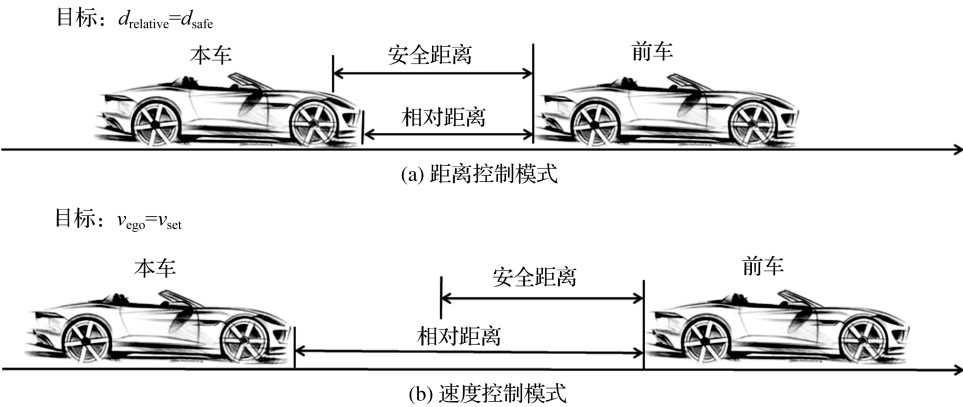


图 1 ACC 系统控制模式示意

Fig. 1 Schematic of ACC system control mode

- 1) 车间距跟随误差, 定义为相对距离  $d_{\text{relative}}$  和安全距离  $d_{\text{safe}}$  之间的跟随误差  $\Delta d$ , 即  $d_{\text{relative}} - d_{\text{safe}}$  被控制收敛到零。
- 2) 速度跟随误差, 定义为前车速度  $v_{\text{lead}}$  与本车速度  $v_{\text{ego}}$  之间的跟随误差  $\Delta v$ , 即  $v_{\text{lead}} - v_{\text{ego}}$  被控制收敛到零。
- 3) 本车的加速度被控制收敛到零。

此外, 在控制策略提出时应当考虑符合国家标准 GB/T 20608—2006《智能运输系统自适应巡航控制系统性能要求与检测方法》<sup>[13]</sup> 中对 ACC 系统工作时应当达到的性能指标要求。

1.2 上层控制器设计

1.2.1 车间距算法

上层控制策略主要考虑速度控制模式和距离控制模式之间的切换。由于跟车性能与乘坐舒适性及燃油经济性等一般成反比<sup>[14-15]</sup>, 如过于追求舒适性和经济性会使本车加速度变化幅度过大, 从而造成车辆频繁切入和跟车安全性降低。

安全车间距算法目前主要分为固定安全车间距和可变安全车间距两种。固定安全车间距指安全车间距始终保持恒定, 不受本车速度、道路交通状况和行驶环境等条件的影响<sup>[16]</sup>, 该算法计算量小、结构简单, 但不能满足实际工况的需求, 因此我们选择可变安全车间距算法。可变安全车间距选取固定值作为时距参数, 其计算公式如下:

$$d_{\text{safe}} = t_h v_{\text{ego}} + d_0。$$
 (1)

式(1)中:  $d_{\text{safe}}$  为安全距离, m;  $t_h$  为驾驶员设定的时距参数, s;  $v_{\text{ego}}$  为本车速度, m/s;  $d_0$  为车辆之间的最小安全距离, m。前、后车跟随状态在 Carsim 软件中进行仿真的场景如图 2 所示。



图 2 Carsim 软件车间距仿真场景截图

Fig. 2 Screenshot of inter-car simulation scenario in Carsim

1.2.2 切换逻辑策略

Carsim 软件为联合仿真车辆提供车辆运动学模型、雷达传感器模块和车速传感器模块。雷达传感器可独立完成模拟任务,收集和传递相关数据,获取道路环境信息、车辆方位信息和运行状态信息,如本车与前车的车距。车速传感器用于获取本车车速信号,当本车与前车车距大于等于安全距离时,控制器切换到速度控制模式;否则控制器切换到距离控制模式。控制器判断驾驶员设定车速和本车车速的关系,当本车车速大于驾驶员设定车速时,切换到加速控制模式;当本车车速等于驾驶员设定车速时,切换到速度保持控制模式;当本车车速小于驾驶员设定车速时,切换到减速控制模式。具体流程如图 3 所示。

1.3 下层控制器设计

1.3.1 模型预测控制原理

MPC 控制器是基于模型的闭环优化控制策略<sup>[17]</sup>,在满足一定约束条件的前提下,可通过动态线性模型实现过程控制。在控制时域内主要针对当前时刻求取最优控制解并反复优化,从而实现整个时域的优化求解。若是长时间跨度以至无穷时间内的最优化控制问题,可将其分解为若干个短时间内的最优控制问题,可以求出相对的最优解。MPC 控制理论结构如图 4 所示,图中  $y_{sp}$  为系统的设定输出,  $y_r$  为参考轨迹,  $u$  为输入,  $y$  为系统的实际输出,  $y_e$  为预测输出,  $e$  为误差,  $y_m$  为模型输出。

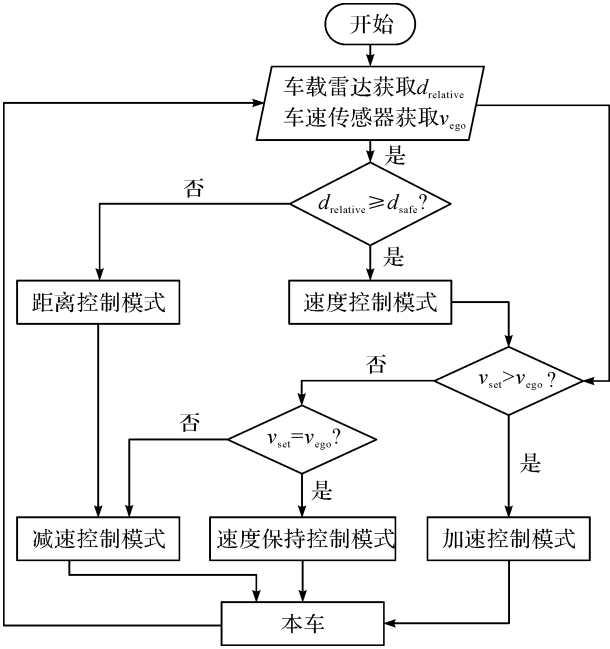


图 3 切换控制模式流程图

Fig.3 Flow chart of switching control mode

MPC 控制器是基于模型的闭环优化控制策略<sup>[17]</sup>,在满足一定约束条件的前提下,可通过动态线性模型实现过程控制。在控制时域内主要针对当前时刻求取最优控制解并反复优化,从而实现整个时域的优化求解。若是长时间跨度以至无穷时间内的最优化控制问题,可将其分解为若干个短时间内的最优控制问题,可以求出相对的最优解。MPC 控制理论结构如图 4 所示,图中  $y_{sp}$  为系统的设定输出,  $y_r$  为参考轨迹,  $u$  为输入,  $y$  为系统的实际输出,  $y_e$  为预测输出,  $e$  为误差,  $y_m$  为模型输出。

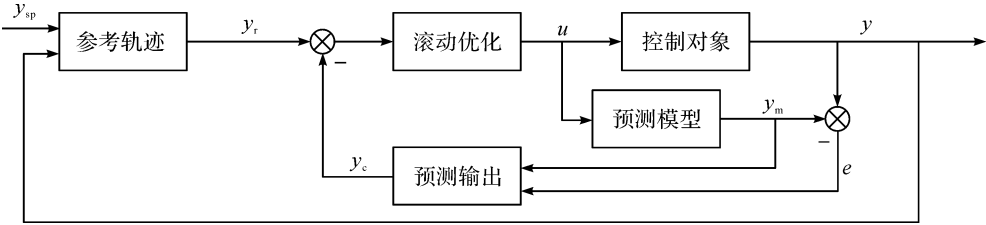


图 4 MPC 控制理论结构

Fig.4 Structure of MPC control theory

以前车与本车的相对速度、实际距离与期望距离的误差为输入量,期望加速度为输出量,构建一个双输入单输出的 MPC 控制结构,以计算出输入到被控系统的控制参数,使得其输出值与期望参考值相符,从而可以有效控制前后两车的车间距。

1.3.2 系统纵向运动学建模

ACC 系统纵向运动学模型包含车辆纵向运动学与两车间运动学,将两车间运动学模型与车辆纵向运动学模型集成,即可建立统一的跟车系统纵向运动学模型,两车间运动学关系为:

$$\begin{cases} d_{relative} = s_{lead} - s_{ego} ; \\ v_{relative} = v_{lead} - v_{ego} . \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中: $d_{relative}$  与  $v_{relative}$  分别为两车的相对距离和相对车速, m 和 m/s;  $s_{lead}$  与  $v_{lead}$  分别为前车的位移和速度, m 和 m/s;  $s_{ego}$  与  $v_{ego}$  分别为本车的位移和速度, m 和 m/s。

由于在车辆控制系统与传动系统中存在一定的滞后和惯性,如控制指令传递到执行机构的过程中就存在一定的延迟,故采用广义车辆纵向运动学系统,利用一阶惯性环节来表示期望加速度与实际加速度的传递特性,其一阶系统传递函数

$$G(s)=\frac{K}{\tau s+1}。$$

(3)

式(3)中: $\tau$ 为惯性环节时间常数,取 0.07; $K$ 为惯性环节系统增益,取 0.97。

广义车辆纵向运动学中本车的加速度

$$a_{ego}=\frac{K}{\tau s+1}a_{desire}。$$

(4)

式(4)中: $a_{ego}$ 为本车的加速度, $\text{m/s}^2$ ; $a_{desire}$ 为车辆的期望加速度, $\text{m/s}^2$ 。

综合式(1)与式(3)可得

$$\begin{cases} \dot{d}_{relative}=v_{relative}+a_{lead}T-a_{ego}T; \\ \dot{v}_{relative}=a_{lead}-a_{ego}; \\ \dot{a}_{ego}=\frac{Ku}{\tau}-\frac{a_{ego}}{\tau}。 \end{cases}$$

(5)

式(5)中: $a_{lead}$ 与  $a_{ego}$ 分别为前后两车的加速度, $\text{m/s}^2$ ; $T$ 为采样时间, $\text{s}$ 。

取系统变量  $\boldsymbol{x}=[d_{relative},v_{relative},a_{ego}]^T$ ,控制变量  $\delta=a_{desire}$ ,建立广义纵向运动学模型如下:

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\delta+\boldsymbol{G}\varphi。$$

(6)

式(6)中: $\boldsymbol{A}$ 、 $\boldsymbol{B}$ 和  $\boldsymbol{G}$ 为系数矩阵, $\varphi=a_{lead}$ 为输入干扰量。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & -T \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1/\tau \end{bmatrix},\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K/\tau \end{bmatrix},\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

进一步将式(6)离散化,可得离散化的系统状态空间方程为

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}(k)+\boldsymbol{G}_1\varphi(k)。$$

(7)

式(7)中: $\boldsymbol{A}_1$ 、 $\boldsymbol{B}_1$ 和  $\boldsymbol{G}_1$ 均为离散状态方程的系数矩阵, $\boldsymbol{A}_1=\boldsymbol{I}+\boldsymbol{T}\boldsymbol{A}$ , $\boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{T}\boldsymbol{B}$ , $\boldsymbol{G}_1=\boldsymbol{T}\boldsymbol{G}$ , $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵; $\varphi(k)$ 为当前时刻的输入干扰量, $k=0,1,2,\cdots$ ,为正整数。

2 仿真试验及结果分析

2.1 MPC 控制器设置

MPC 控制器通过预测系统纵向运动学模型的未来状态来计算控制参数,根据式(7)的纵向运动学模型的离散状态空间方程可知,可控变量数量为 1,可测扰动变量数量为 1,可测变量数量为 2,具体的结构设计如图 5 所示。设置采样时间为 0.1 s,模型输入、输出系统参数设置见表 1。

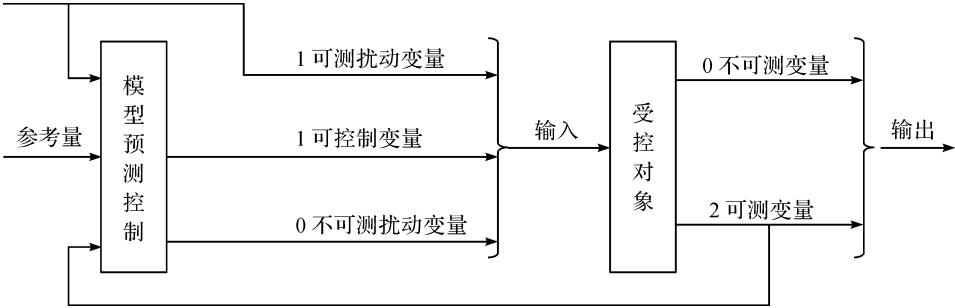


图 5 MPC 控制器结构示意图

Fig. 5 Diagram of MPC controller structure

在实际 MPC 控制器参数调试过程中,若控制范围过小,则控制效果较差;若控制范围过大,那就会导致前部分的控制范围效果较好,后部分控制范围则效果较差,同时会带来大量的计算工作量。随着预测范围和控制范围的增加,系统行为的响应会变缓,因此需合理设定控制范围。对 MPC 控制器参数反复调试,仿真结果表明:预测范围值和控制范围值分别在大于 10 和 3 之后,范围值对系统行为响应的影响明显减弱,故预测范围和控制范围的值分别设为 10 和 3。



表 1 模型输入、输出系统参数设置

Table 1 System parameter settings of input and output values

系统		类型	名称	单位	公称值	比例系数
模型输入	$u(1)$	可控制变量	$a_{\text{ego}}$	$\text{m/s}^2$	0	5
	$u(2)$	可测扰动变量	$a_{\text{lead}}$	$\text{m/s}^2$	10	50
模型输出	$y(1)$	可测输出变量	$d_{\text{relative}} - d_{\text{safe}}$	m	1	100
	$y(2)$	可测输出变量	$v_{\text{ego}}$	m/s	5	50

输入值的约束一般由车辆物理极限决定,所有输入约束通常设置为硬约束,而输出约束设置为软约束,详细约束设置见表 2。

表 2 模型输入、输出约束设置

Table 2 Constraint settings of input and output values

系统		类型	最小值	最大值	最小速率	最大速率
输入约束	$u(1)$	可控制变量	-3	2	$-\infty$	$+\infty$
输出约束	$y(1)$	可测输出变量	0.5	$-\infty$		
	$y(2)$	可测输出变量	0	0.1		

在定义输入和输出变量的权重系数时,如果输入值或输出值有实际意义,则其权重设置为非零,具体权重设置见表 3。

表 3 模型输入、输出权重设置

Table 3 Weight settings of input and output values

系统		类型	权重	权重速率	目标
输入权重	$u(1)$	可控制变量	0	0.1	公称值
输出权重	$y(1)$	可测输出变量	0		
	$y(2)$	可测输出变量	1		

2.2 联合仿真建模

Carsim 软件可实时模拟车辆的运行过程并输出其运动学特性。本文选用 C 级掀背车,发动机功率为 125 kW,采用 6 级自动变速器,前轮驱动,装备防抱死制动系统(anti-lock braking system,ABS)。因主要涉及车辆之间纵向的 ACC 控制策略,故转向系统、悬架和轮胎均使用默认设置。将本车、前车的纵向速度及两车间的相对距离等作为输出模块,与 MATLAB/Simulink 中所对应的各个模块相连接,构建的联合仿真模型如图 6 所示。

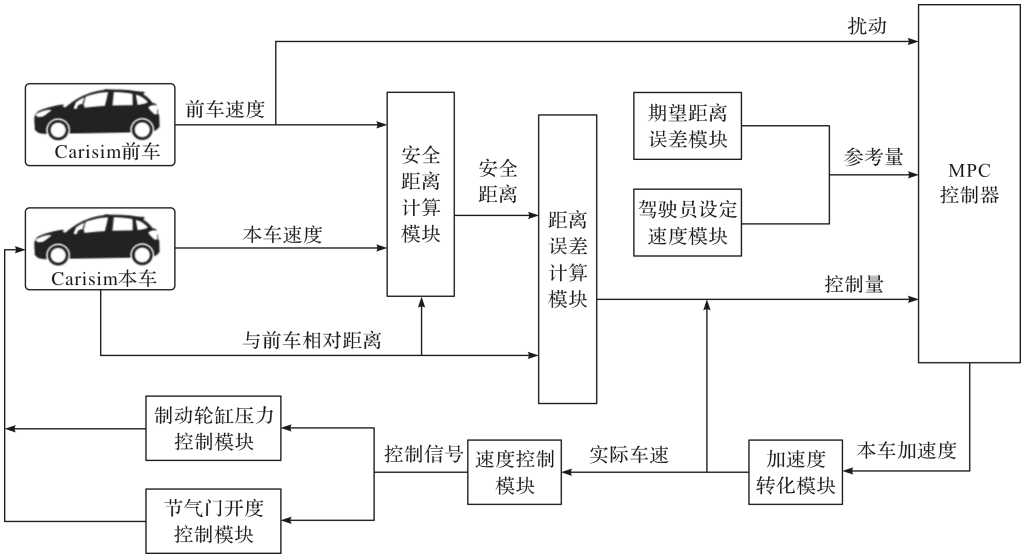


图 6 基于 Carsim-MATLAB 联合仿真模型框图

Fig. 6 Co-simulation model diagram based on Carsim and MATLAB

Carsim 软件将实时前车速度、本车速度及两车间距离值输入安全距离计算模块,安全距离和两车间距离差则输入距离误差计算模块。距离误差作为控制量输入 MPC 控制器,同时将驾驶员设定速度和期望距离误差作为参考量输入,前车的实时车速作为测量扰动信号输入,MPC 控制器则输出被控制变量,即本车加速度。MPC 控制器可进行滚动优化,并在约束条件下保持设定的期望速度,同时约束条件会强制执行两车间距离大于安全距离。为满足国家标准<sup>[13]</sup>要求,须将本车加速度范围限制在 $-3\sim 2\text{ m/s}^2$ 内。

3 仿真试验结果分析

在设置完 Carsim 和 MATLAB/Simulink 相应的参数,完成自适应巡航分层控制策略设计后,对其联合仿真模型进行仿真分析验证。自适应巡航除了达到预设时速这一定速巡航功能外,还要保持与前车的安全距离,为此采用不同的控制器对其自适应稳态跟车功能分别进行仿真试验,结果对比如图 7 所示。

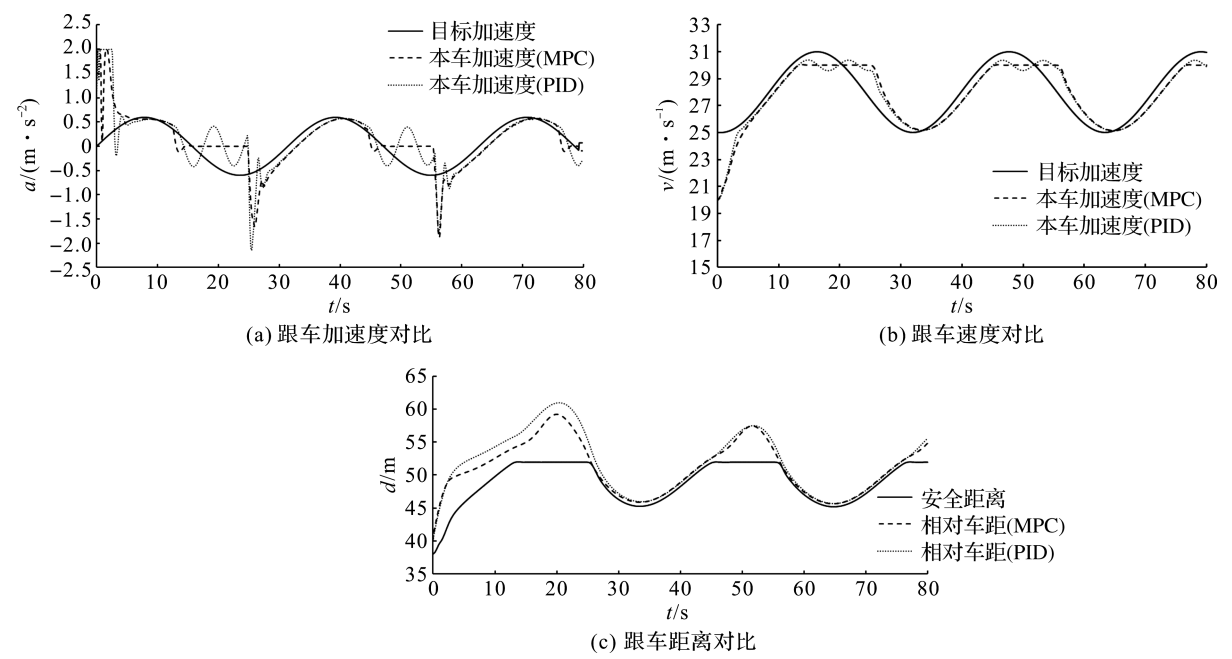


图 7 自适应稳态跟车功能仿真试验结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation experimental results of adaptive steady-state following function

由图 7(a)可知,加速度曲线在 0 附近有震荡,这是由计算出的加速度(油门开度)和当前车速使得拥有 6 级挡位(固定的传动比)的自动变速器换挡引起的。当目标加速度开始变化时,基于 MPC 和 PID 控制都能及时响应,不断接近目标加速度并在  $t=8\text{ s}$  左右跟上目标加速度。若目标加速度在短时间内变化较大,如在  $13\sim 30\text{ s}$  和在  $44\sim 53\text{ s}$  内,PID 控制加速度曲线波动明显偏大,其峰值差达  $4.43\text{ m/s}^2$ ;而 MPC 加速度曲线波动则较小,峰值差仅为  $1.65\text{ m/s}^2$ 。由此表明基于 MPC 控制策略的本车加速过程较平稳,加速曲线较平滑,跟踪效果整体可提升约 20%。与此同时,本车加速度变化均值也降低约 23%,其加速度值始终处于 $-1.8\sim 2\text{ m/s}^2$ 的合理区间,这可有效提升驾驶舒适性,也满足国家规定的范围要求 $-3\sim 2\text{ m/s}^2$ 。

由图 7(b)可知,两种控制方法车辆在跟踪目标车速变化时差距较小,由于 MPC 采用滚动算法,能根据系统实时测量值对预测输出值进行反馈校正,以缩小跟踪误差,使 MPC 模式下车速误差控制在 $-2.2\sim 5\text{ m/s}$ ,而 PID 模式下车速误差则控制在 $-2.7\sim 5\text{ m/s}$ 。

由图 7(c)可知,基于 PID 控制策略的车间距误差范围在 $-0.5\sim 9\text{ m}$ ,跟车距离并不太理想;而基于 MPC 控制策略的车间距误差始终控制在 $-0.5\sim 7.3\text{ m}$ ,可保持较精准的安全距离,平均误差降低约 12%。在实际跟车环境中,能有效减少追尾、加塞等情况发生的概率。

4 结 论

我们采用 Carsim 和 MATLAB/Simulink 进行联合仿真试验,对所得的结果通过比较分析后得出以下结论:

1)在联合仿真试验平台中,Carsim 软件实现前车与本车的两车实时运动仿真场景,Simulink 则通过安全距离计算、MPC 控制器等模块建立控制策略,联合仿真平台无需自建驾驶员模型和仿真工况就可有效完成仿真试验。

2)自适应巡航控制策略采用分层控制思想,分为上下层控制策略,上层控制策略进行速度控制模式和距离控制模式切换,下层控制策略则基于 MPC 控制器和 PID 控制器确定本车加速度。仿真试验结果表明本车能有效跟踪前车状态变化,该控制策略是正确有效的。

3)联合仿真试验结果还表明,我们设计的 MPC 控制器与 PID 控制器相比,前者在跟车工况下,本车的加速度峰值差、加速度变化均值均有所下降,因此能有效提高驾驶舒适性和行驶稳定性;同时跟车距离误差与后者相比控制在更小的范围内,能有效减少追尾、加塞等情况的发生。

参考文献:

[1] PADEN B, CAP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2016,1(1):33.

[2] 张立森. 自适应巡航控制系统发展现状与前景分析[J]. 汽车工业研究,2017(7):18.

[3] 刘新雨,吴学勤,王畅,等. 自适应巡航控制系统对驾驶安全性的影响研究[J]. 中国安全科学学报,2017,27(4):43.

[4] 张丽霞,刘涛,潘福全,等. 驾驶员因素对道路交通事故指标的影响分析[J]. 中国安全科学学报,2014,24(5):79.

[5] THRUN S, MONTEMERLO M, DAHLKAMP H, et al. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge [J]. Journal of Field Robotics,2006,23(9):661.

[6] SHAKOURI P, ORDYS A W, LAILAD S, et al. Adaptive Cruise Control System: Comparing Gain-Scheduling PI and LQ Controllers[J]. IFAC Proceedings,2011,44(1):12964.

[7] 张炳力,曹聪聪,白广路,等. 多模式切换的分层自适应巡航系统[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(6):190.

[8] 王文颀,梁军,陈龙,等. 基于深度强化学习的协同式自适应巡航控制[J]. 交通信息与安全,2019,37(3):93.

[9] 李世豪,吴岩,卢羽. 基于模糊 PID 的汽车自适应巡航控制策略研究[J]. 汽车实用技术,2018(23):176.

[10] 李肖含. 汽车自适应巡航控制系统模糊控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.

[11] 袁泉,高岩,袁晨璐. 基于人-机-环境因素的未来交通事故风险研究[J]. 系统仿真学报,2019,31(3):566.

[12] 张乐. 基于 CNN 的车辆安全距离感知系统研究与设计[D]. 成都:成都理工大学,2018.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 智能运输系统自适应巡航控制系统性能要求与检测方法:GB/T 20608—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[14] 荆亚杰. 基于 MPC 算法的车辆多目标自适应巡航控制系统研究[D]. 西安:长安大学,2019.

[15] 李世豪. 基于 MPC 的汽车自适应巡航控制策略研究[D]. 西安:长安大学,2019.

[16] DARBHA S, RAJAGOPAL K R. Intelligent cruise control systems and traffic flow stability[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,1999,7(6):329.

[17] 龚建伟,姜岩,徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.