

## 基于 T-S MPC 的车辆自适应巡航控制策略研究

刘晓龙 张 蕾 王 清 李然然 安 馨  
(天津职业技术师范大学汽车与交通学院 天津 300222)

**摘 要:** 针对于汽车自适应巡航系统面对复杂工况时自适应性不强的问题,提出了一种基于 T-S 模糊变权重模型预测控制(Takagi-Sugeno fuzzy model predictive control, T-S MPC)的自适应巡航分层控制策略。首先上层控制器基于安全距离模型将自适应巡航系统划分为定速巡航模式、多目标优化控制的跟随模式和紧急制动模式;下层控制器基于车辆逆动力学模型,将上层控制器输出的期望加速度转变为节气门开度或制动压力;其次考虑到权重系数对控制精度的影响,建立基于 T-S 模糊控制的变权重模型预测控制器;最后搭建 Carsim Simulink 联合仿真平台,验证控制策略的准确性、适应性和跟踪响应速度。结果表明,在定速巡航工况时,T-S MPC 控制方法跟踪响应时间为 1.54 s,较 PID 和传统 MPC 控制跟踪响应快;在跟随和混合工况时,T-S MPC 控制方法均方根误差为分别为 0.307 3、2.775,均低于 PID、PID+LQR 和传统 MPC 控制的均方根误差、并且自适应性好,有效提高了跟车性能与安全性。

**关键词:** 自适应巡航;分层控制;T-S MPC;控制策略

**中图分类号:** TN703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Research on vehicle adaptive cruise control strategy based on T-S MPC

Liu Xiaolong Zhang Lei Wang Qing Li Ranran An Xin

(School of Automotive and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the adaptive cruise system of automobile is not adaptive when facing complex working conditions, an adaptive cruise hierarchical control strategy based on Takagi-Sugeno fuzzy model predictive control (T-S MPC) is proposed. Firstly, the upper controller divides the adaptive cruise system into fixed-speed cruise mode, following mode with multi-objective optimal control and emergency braking mode based on the safety distance model. The lower controller transforms the desired acceleration output from the upper controller into throttle opening or braking pressure based on the inverse vehicle dynamics model. Secondly, considering the influence of the weighting coefficients on the control accuracy, the control strategy is established based on the T-S fuzzy control based variable weight model predictive controller. Finally, Carsim Simulink joint simulation platform is built to verify the accuracy, adaptability and tracking response speed of the control strategy. The results show that the tracking response time of the T-S MPC control method is 1.54 s, which is faster than the tracking response of PID and traditional MPC control in the cruising condition. In the following and mixing conditions, the root mean square error of the T-S MPC control method is 0.307 3 and 2.775, which is lower than that of the PID, PID+LQR, and traditional MPC control, and it has good adaptability, which effectively improves the following performance and safety. This effectively improves the following performance and safety.

**Keywords:** adaptive cruise; hierarchical control; T-S MPC; control strategy

### 0 引 言

近年来,全球汽车数量逐年增加,根据公安部统计,截

至 2023 年底全国汽车保有量达到 4.35 亿辆,因此提高车辆行车安全和便捷性是目前迫切需要解决的问题,全球各汽车厂商都在开发车辆的高级驾驶辅助(ADAS)系统,特

别是自适应巡航(ACC)系统的研发备受关注。

作为汽车驾驶辅助系统的重要组成部分,ACC系统不仅能够大大减轻驾驶员的驾驶负担,还可以在危险工况时减少驾驶员的操作错误,提高车辆行驶的安全性。目前,国内外学者针对于自适应巡航控制策略研究已取得一定成果。Wang等<sup>[1]</sup>针对车辆的机动性、燃油经济性和安全性,提出了一种随机预测-自适应巡航控制(P-ACC)系统,该系统有效解决了车辆在行驶过程中的不确定性,并自动适应各种驾驶场景。杨铭菲等<sup>[2]</sup>以四轮轮毂电机驱动电动汽车为研究对象,基于PID控制算法和线性二次型调节器搭建分层控制器,在加减速工况下有良好的实用性和有效性。刘明春等<sup>[3]</sup>针对现阶段ACC系统切换模式较为简单,不能适应复杂交通状况的问题,提出了一种基于多模式切换的ACC策略,有效提高了车辆跟车性和舒适性。欧健等<sup>[4]</sup>提出了一种具有紧急制动功能的多模式自适应巡航控制策略,设计基于模糊PID的定速巡航模式以及基于模型预测控制的多目标优化控制的跟随模式,满足了跟随性、安全性和舒适性。张丽萍等<sup>[5]</sup>基于最优控制理论建立了ACC分层控制方法,较好地实现了车辆自适应巡航功能。然而现阶段的ACC系统的控制方法面对不同工况时适应性不强,控制精度受被控状态量和目标状态量的差异影响较大,对于控制误差没有预见性,导致控制精度不高,跟踪响应慢。针对以上问题,提出了一种基于T-S模糊变权重模型预测控制(Takagi-Sugeno fuzzy model predictive control, T-S MPC)的自适应巡航分层控制策略。上层控制器基于安全距离模型对ACC系统工作模式进行划分,采用模型预测控制(model predictive control, MPC)算法,以车辆加速度为控制量对ACC工作模式进行控制;下层控制器根据期望加速度值控制汽车节气门开度和制动压力。考虑MPC权重系数对控制误差的影响,引入T-S模糊控制算法实现自适应变权重MPC控制,有效提高了车辆跟车性能与安全性。

## 1 自适应巡航系统控制理论基础

自适应巡航系统根据安全距离模型将系统划分为多种模式<sup>[6-8]</sup>,通过传感器获得两车之间的距离和速度等信息,采用优化控制算法,输出各模式下的期望加速度,经车辆逆动力学模型将期望加速度转化成节气门开度或制动压力<sup>[9]</sup>,控制本车加速或制动,实现自适应巡航功能<sup>[10]</sup>。

### 1.1 安全距离模型

车辆在行驶过程中,两车之间的距离大致可分为距离较远、适中和极小3种情况。为了保证车辆的安全行驶,将两车之间的车间距分为巡航距离、跟随距离和紧急制动距离。

#### 1) 巡航距离

考虑到两车相距过远时,采用车头时距定义巡航间距<sup>[11]</sup>,如下:

$$S_1 = T_h v_x + d_0 \quad (1)$$

式中: $S_1$ 为巡航间距; $T_h$ 为车头时距; $v_x$ 为自车车速; $d_0$ 为最小固定车距。

#### 2) 紧急制动距离

当两车距离极小时,为了保证本车有足够的距离来进行紧急制动,制动安全距离如下:

$$\begin{cases} S_w = \frac{1}{2} \left( \frac{v_x^2 - v_f^2}{\varphi g} \right) + v_{rel} T_h + v_{rel} T_s + v_{rel} \tau_s + d_0 \\ S_z = \frac{1}{2} \left( \frac{v_x^2 - v_f^2}{\varphi g} \right) + v_{rel} T_s + v_{rel} \tau_s + d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_w$ 为预警距离; $S_z$ 为紧急制动距离; $v_x$ 为本车车速; $v_f$ 为前车车速; $v_{rel}$ 为本车与前车速度差; $T_h$ 为驾驶员反应时间; $T_s$ 为制动器起作用时间; $\tau_s$ 为间距系数; $\varphi$ 为路面附着系数; $g$ 为重力加速度。

#### 3) 跟随距离

当两车间距在巡航间距和紧急制动间距之间时,为了防止因两车距离过远而被加塞等情况出现,跟随距离如下:

$$S_3 = v_x \tau + \int_{t_1}^{t_2} (v_x - v_f) dt + d_0 \quad (3)$$

为满足仿真控制需要,式(3)进行离散化处理,转换后为:

$$S_3 = v_x \tau + (v_x - v_f) T + d_0 \quad (4)$$

式中: $\tau$ 为车头时距; $T$ 为采样时间; $S_3$ 为期望跟随距离。

## 1.2 车辆逆动力学模型

### 1) 车辆驱动逆模型

自适应巡航控制系统主要控制车辆的纵向运动,根据汽车行驶方程式,可求得发动机输出转矩与行驶阻力之间的关系:

$$T_{iq} = \frac{r}{i_g i_0 \eta_t} \left( G f \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \right) \quad (5)$$

式中: $i_g$ 为变速器传动比; $T_{iq}$ 为发动机输出转矩; $\eta_t$ 为传动效率; $r$ 为车轮半径; $\alpha$ 为坡度角; $G$ 为汽车重力; $f$ 为滚动阻力系数; $C_D$ 为空气阻力系数; $\delta$ 为旋转质量换算系数; $A$ 为整车迎风面积; $u_a$ 为车速; $m$ 为整车质量; $i_0$ 为主减速器传动比。

当汽车在坡度角为0的道路上行驶时,即 $\cos \alpha = 1$ ,  $\sin \alpha = 0$ ,此时,式(5)转化为:

$$T_{iq} = \frac{r}{i_0 i_g \eta_t} \left( \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + G f + \delta m \frac{du}{dt} \right) \quad (6)$$

基于发动机map图,可得发动机转速、转矩和节气门开度之间的关系:

$$\theta = engine^{-1}(T_{iq}, N_e) \quad (7)$$

### 2) 车辆制动逆模型

在制动过程中,不考虑加速阻力和驱动力,且假定汽车在平坦路面上行驶,纵向制动力 $F_b$ 如下:

$$F_b = -ma_{des} - \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 - mgf \quad (8)$$

式中:  $a_{des}$  为期望加速度。

在地面最大制动力约束范围内,车辆制动压力与制动力之间呈线性关系,有:

$$F_b = K \cdot P_{des} \quad (9)$$

式中:  $P_{des}$  为制动压力;  $K$  为制动力系数,经过制动压力仿真确定  $K=1\ 230.8$ 。期望制动减速度与制动压力之间的关系:

$$P_{des} = \frac{\left| -ma_{des} - \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 - mgf \right|}{K} \quad (10)$$

## 2 自适应巡航系统设计

汽车自适应巡航控制系统采用分层控制,其控制系统设计如图1所示。上层控制器根据安全距离模型划分为巡航、跟随和紧急制动3种模式;并采用MPC<sup>[12-13]</sup>控制算法,输出3种模式下的期望加速度;下层控制器根据上层控制器输出的期望加速度,通过车辆逆动力学模型转换为对应的节气门开度和制动压力,实现对车辆行驶状态的有效调控。

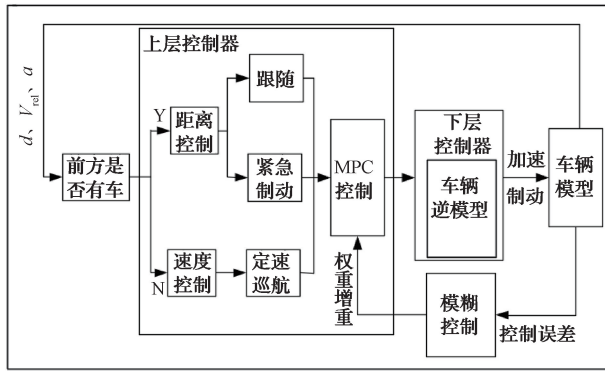


图1 汽车自适应巡航控制系统

Fig. 1 Automotive adaptive cruise control system

### 2.1 模式切换逻辑

$S_1$ 、 $S_2$  分别是各种模式的切换条件。当满足条件时,则进入相应模式,否则保持该模式不变,切换流程如下。

1)若  $S \geq S_1$ ,则进入巡航模式,车辆以设定的巡航车速行驶。

2)若  $S_1 > S > S_2$ ,则进入跟随模式,车辆以  $S_3$  为期望车距,稳定跟随前车行驶。

3)若  $S \leq S_2$ ,则进入紧急制动模式,车辆紧急制动。

### 2.2 MPC 控制

采用MPC算法对3种模式进行控制,其中跟随模式和紧急制动模式时,MPC控制的期望车间距为  $S_3$ 、 $S_2$ ;定速巡航模式时切换为车速控制。

1)纵向运动学状态方程

根据期望车距或期望车速,定义MPC控制误差为:

$$\begin{cases} \Delta d = d - d_{ref} \\ \Delta v = v_x - v_{ref} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\Delta d$  为车间距控制误差;  $\Delta v$  为车速控制误差;  $d$  为实际车间距;  $d_{ref}$  为期望车间距;  $v_{ref}$  为期望车速。

选取车间距控制误差、相对车速、自车加速度作为MPC预测模型的状态量,即  $\mathbf{x} = [\Delta d, v_{rel}, a_x]^T$ ;取  $\omega$  为系统扰动量,  $\omega = a_f$ ,其中  $a_f$  为前车加速度;选取车间距误差、相对车速、自车加速度作为MPC待优化目标,即  $\mathbf{y} = [\Delta d, v_{rel}, a_x]^T$ 。纵向运动学状态空间方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{G}\omega(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & -T(\tau+T) \\ 0 & 1 & -T \\ 0 & 0 & 1-T/T_L \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_L T / T_L \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -\tau & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -T \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中:  $\tau$  为车头时距;  $T$  为采样时间;  $T_L$  为惯性环节时间常数。

#### 2)预测方程与目标函数

MPC可以预测未来  $p$  时刻的两车车间距和相对速度,并与期望值进行比较,求出最优控制序列。根据式(12),可建立预测时域内的MPC预测方程,即:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_p(t+p|t) &= \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}a_{des}\mathbf{x}(t+n) + \bar{\mathbf{G}}\omega(t+p) + \bar{\mathbf{H}}e_r(t) \\ \hat{\mathbf{Y}}_p(t+p|t) &= \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{D}}a_{des}\mathbf{x}(t+n) + \bar{\mathbf{E}}\omega(t+p) + \bar{\mathbf{F}}e_r(t) \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $p$  为预测时域;  $\hat{\mathbf{X}}_p(t+p|t)$  为  $p$  时域内的预测状态变量集合;  $\hat{\mathbf{Y}}_p(t+p|t)$  为  $p$  时域内的预测输出变量集合;  $e_r$  为实际状态量与预测值之间的误差;  $\omega(t+p)$  为  $p$  时域内的干扰量集合,且假定每一时刻值相同;  $\mathbf{E}$  为  $n$  阶单位矩阵,  $n$  为控制时域;  $a_{des}(t)$  为系统输出量。

为减小MPC预测模型的控制误差,引入权重系数  $R$  和  $Q$ ,基于MPC预测方程,建立预测时域  $p$  内的多目标优化函数:

$$J = \sum_{i=1}^p [\hat{\mathbf{y}}_p(t+i|t) - \hat{\mathbf{y}}_r(t+i)]^T \mathbf{Q} [\hat{\mathbf{y}}_p(t+i|t) - \hat{\mathbf{y}}_r(t+i)] + \sum_{i=1}^{n-1} a_{des}(t+i)^T \mathbf{R} a_{des}(t+i) \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{Q}$  为输出量权重矩阵,  $\mathbf{Q} = \text{diag}[\mathbf{Q}_d; \mathbf{Q}_{vx}; \mathbf{Q}_{Ax}]$ ,其中  $\mathbf{Q}_d$  为横向位置权重系数,  $\mathbf{Q}_{vx}$  为目标车速权重系数,  $\mathbf{Q}_{Ax}$  为控制增量权重系数;  $\mathbf{R}$  为控制量权重系数。

3)约束条件

考虑车辆在跟驰行驶时的稳定性,对 MPC 控制引入状态量和控制量约束。为使两车车间距尽快达到期望距离,并保证车间距保持在期望范围内,当时间  $t \rightarrow \infty$ ,控制器应满足如下性能要求:

$$\begin{cases} \Delta d(t) \rightarrow 0 \\ \Delta v(t) \rightarrow 0 \end{cases} \tag{15}$$

考虑车辆行驶时的安全性,定义车距硬约束  $d_c$ :

$$d_c \leq \Delta d(t) = d(t) - d_{des}(t) \tag{16}$$

考虑车辆行驶过程中的舒适性、燃油经济性和跟踪性能,对车间距误差和相对速度进行硬约束,即:

$$\begin{aligned} \Delta d_{\min} &\leq \Delta d \leq \Delta d_{\max} \\ \Delta v_{\min} &\leq \Delta v \leq \Delta v_{\max} \\ a_{x\min} &\leq a_x \leq a_{x\max} \\ u_{\min} &\leq u \leq u_{\max} \\ \Delta u_{\min} &\leq \Delta u \leq \Delta u_{\max} \end{aligned} \tag{17}$$

式中: $u$  为控制量; $\Delta u$  为控制增量。

3 模糊变权重 T-S MPC 控制器设计

为了提高 MPC 控制的跟踪精确性和稳定性,改善自适应能力,采用 T-S 模糊<sup>[14]</sup> 控制在线优化在 MPC 控制,实现自适应权重控制。

3.1 模糊设计

由式(13)可知,在 MPC 多目标优化函数中,影响 MPC 跟踪性能的权重系数有  $Q_d$ 、 $Q_{vx}$ 、 $Q_{Ax}$ 、 $R$ 。通过仿真测试,得出  $Q_d$ 、 $Q_{Ax}$  权重对控制精度和稳定性影响明显,因此设 T-S 模糊控制器的输入为横向位置误差  $\Delta d$  和加速度误差  $\Delta A_x$ ,输出为权重系数  $Q_d$ 、 $Q_{Ax}$  的增量  $\Delta Q_d$ 、 $\Delta Q_a$ 。其中变量  $\Delta d$  的论域设置为  $[-1, 3]$ ,变量  $\Delta A_x$  的论域设置为  $[-0.4, 0.3]$ 。输入变量模糊子集为 4 个,分别为  $\{L$  (小),  $M$  (中),  $H$  (大),  $V$  (极大)  $\}$ 。 $\Delta d$  和  $\Delta A_x$  均采用三角隶属度函数,其对应的隶属度函数如图 2(a)、(b)所示。

T-S 模糊理论中,输出与输入变量关系如下:

$$R_i: \text{if } \Delta d = S^i \text{ and } \Delta A_x = S^i \text{ then } y_i = \Delta Q_i \tag{18}$$

式中: $R_i$  为模糊规则;  $S^i$  为模糊规则中的模糊子集; $y_i$  为输出变量; $\Delta Q_i$  为输出常数。

输入变量  $\Delta d$ 、 $\Delta A_x$  与输出变量  $\Delta Q_d$ 、 $\Delta Q_a$  之间的关系如表 1、2 所示。

输入、输出模糊规则的曲面如图 3(a)、(b)所示。

3.2 模糊变权重 T-S MPC 控制

基于模糊控制输出和 MPC 多目标优化函数,建立权重系数  $Q_d$ 、 $Q_{Ax}$  与输出变量  $\Delta Q_d$ 、 $\Delta Q_a$  之间的函数关系:

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_{dvalue} \cdot \Delta Q_d \\ Q_{Ax} &= Q_{Axvalue} \cdot \Delta Q_a \end{aligned} \tag{19}$$

式中:  $Q_{dvalue} = 1.05$ ,  $Q_{Axvalue} = 0.5$ 。

在每个采样时刻,模糊控制算法根据输入量  $\Delta d$ 、 $\Delta A_x$ ,基于模糊规则输出 MPC 权重系数增量  $\Delta Q_d$ 、 $\Delta Q_a$ ,

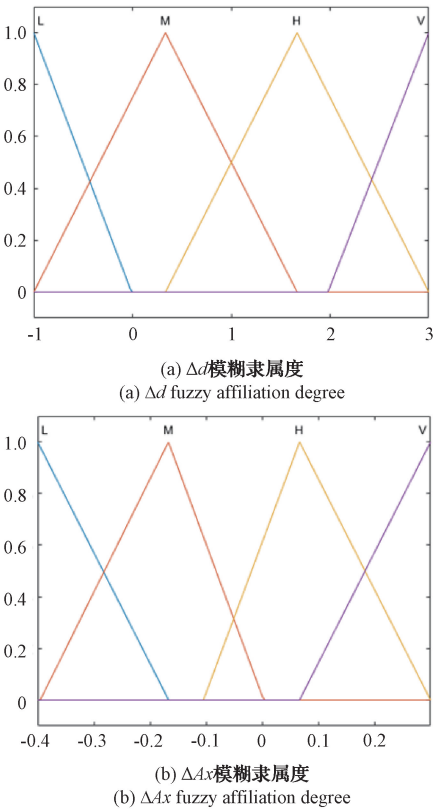


图 2 T-S 模糊隶属度图  
Fig. 2 T-S fuzzy affiliation diagram

表 1 输出变量  $\Delta Q_d$   
Table 1 Output variable  $\Delta Q_d$

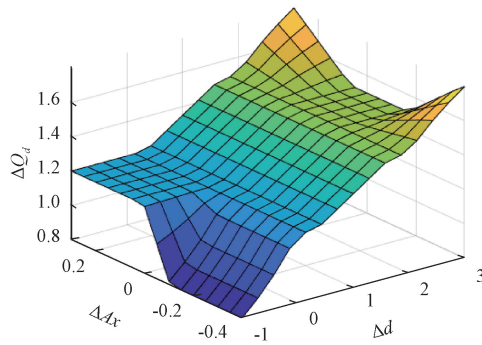
$\Delta d$	$\Delta A_x$			
	L	M	H	V
L	0.8	0.8	1.2	1.2
M	0.8	1.2	1.2	1.5
H	1.2	1.5	1.5	1.5
V	1.5	1.5	1.5	1.8

表 2 输出变量  $\Delta Q_a$   
Table 2 Output variable  $\Delta Q_a$

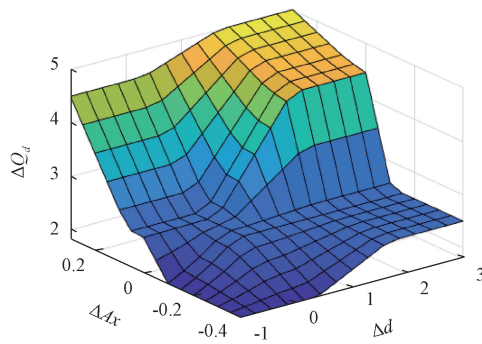
$\Delta d$	$\Delta A_x$			
	L	M	H	V
L	1.8	1.8	2.5	4.5
M	1.8	2.5	2.5	4.5
H	2.5	2.5	4.5	5
V	2.5	4.5	4.5	5

并根据式(19)计算出 MPC 的权重系数,更新至 MPC 多目标优化函数中,实现 MPC 变权重操作,其控制流程如图 4 所示。其中,  $d_{ref}$  为期望车间距,  $Ax_{ref}$  为期望加速度。





(a)  $\Delta d$ 模糊规则曲面  
(a)  $\Delta d$  fuzzy regular surface map



(b)  $\Delta A_x$ 模糊规则曲面  
(b)  $\Delta A_x$  fuzzy regular surface map

图3 模糊输出曲面

Fig. 3 Fuzzy output surface map

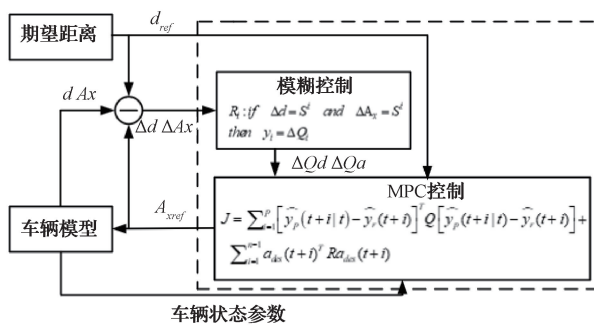


图4 模糊变权重 T-S MPC 控制流程

Fig. 4 Fuzzy variable weight T-S MPC control flow

## 4 多工况仿真验证

### 4.1 仿真环境

应用 Carsim 软件<sup>[15]</sup>,建立前驱式 B 级轿车,其发动机功率为 125 kW,匹配 5 速自动变速器,制动系统具有 ABS 功能,其主要参数如表 3 所示。

搭建 Carsim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台<sup>[16-17]</sup>,Simulink 模型如图 5 所示。Simulink 输入变量为纵向速度、加速度、发动机曲轴转速、液力变矩器输出转矩、变速器传动比和两车相对距离,输出量为节气门开度和制动主缸压力。

表 3 车辆主要参数

Table 3 Main vehicle parameters

参数名称	参数符号	参数大小
汽车质量	$m$	1 270 kg
空气阻力系数	$CD$	0.3
迎风面积	$A$	1.6 m <sup>2</sup>
发动机功率	$Pe$	125 kW
路面附着系数	$\phi$	0.85
滚动阻力系数	$f$	0.012
车轮半径	$R$	0.325 m

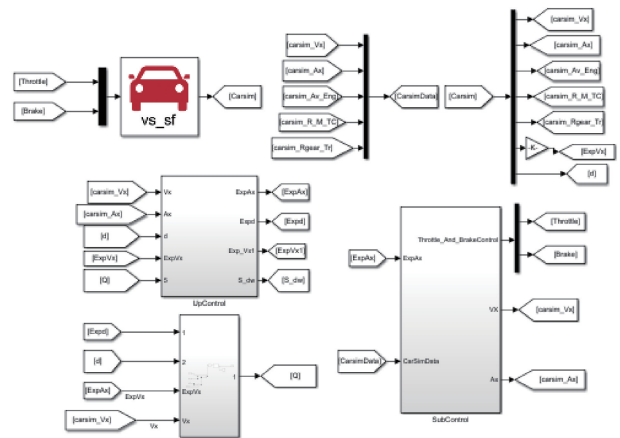


图5 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model

图 5 中, Carsim\_Vx 为纵向速度;Carsim\_Ax 为加速度;Carsim\_AV\_Eng 为发动机曲轴转速;Carsim\_R\_M\_TC 为液力变矩器输出转矩;Carsim\_Rgear\_Tr 为变速器传动比; $d$  为两车相对距离;Throttle 为节气门开度;Brake 为制动主缸压力。

### 4.2 仿真工况及对比结果分析

为了更好的验证所提出的控制算法在面对不同工况时的准确性、跟踪响应速度和自适应性,设计了 3 种测试工况,分别是定速巡航工况、跟随行驶工况和混合工况;并于传统 MPC 和文献[1]的控制策略进行对比,文献[2]所设计的控制策略采用定速巡航为 PID 控制,跟随行驶采用线性二次型最优控制(LQR),其 PID 具体的参数为  $K_p = 3$ 、 $K_i = 0$ 、 $K_d = 0$ ;LQR 控制的最终表达式为:

$$u = k_1(\zeta - d_{des}) + k_2\dot{\zeta} - k_3\ddot{x}_1 \quad (20)$$

式中: $u$  为期望加速度; $\zeta$  为实际车间距; $d_{des}$  为期望车间距; $\dot{\zeta}$  为车速; $\ddot{x}_1$  为车辆加速度; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为状态反馈系数,其大小分别为  $k_1 = 0.3842$ 、 $k_2 = 1.1363$ 、 $k_3 = 0.8249$ 。

#### 1) 定速巡航工况

定速巡航工况主要测试在定速巡航模式下的跟踪响应速度是否满足跟踪性能的要求。设置车辆初始速度为 25 m/s,目标巡航速度为 27.78 m/s,路面附着系数为 0.85,仿真时间为 4 s。观察车辆速度信息,以车辆速度达

到期望速度所经历的时间为评价指标,验证 T-S MPC 控制算法的跟踪响应速度是否符合要求,仿真结果如图 6 所示。

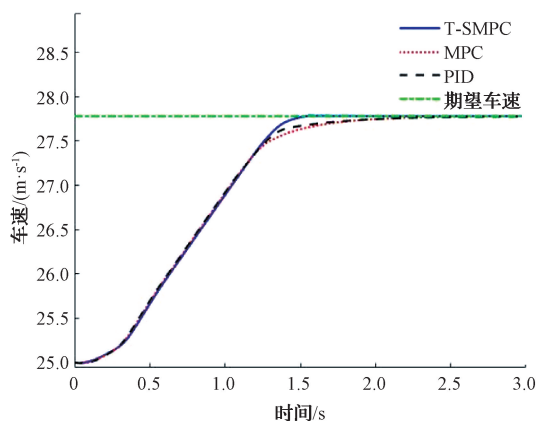


图 6 跟踪速度曲线

Fig. 6 Tracking speed curve

在车辆进入巡航模式时,3种控制方式均能实现车速跟踪。由图 6 可见,纵向速度的初始值为 25 m/s,期望车速为 27.78 m/s,在 1.54 s 时,T-S MPC 控制车速达到期望车速,并进入稳态行驶,而 PID 和传统 MPC 分别大约在 2.62 和 2.36 s 才能达到期望车速,跟踪速度较 PID 和传统 MPC 要快。因此,在相同期望速度和附着系数路面下,相对于 MPC 和 PID 而言,T-S MPC 算法能更快的跟踪上期望速度,跟踪响应速度快。

### 2) 跟随工况

跟随行驶工况,主要测试车辆面对前车加速、强减速、匀速 3 种情况时,控制策略的控制精度是否符合跟随行驶要求。设置自车初始速度为 22.22 m/s,前车初始速度为 25 m/s,两车相距 35 m,仿真时间为 50 s。观察加速度和控制误差变化,通过与 MPC、PID 和文献[2]的 LQR 控制进行对比,验证 T-S MPC 控制算法的控制精度是否符合要求,仿真结果如图 7 和 8 所示。

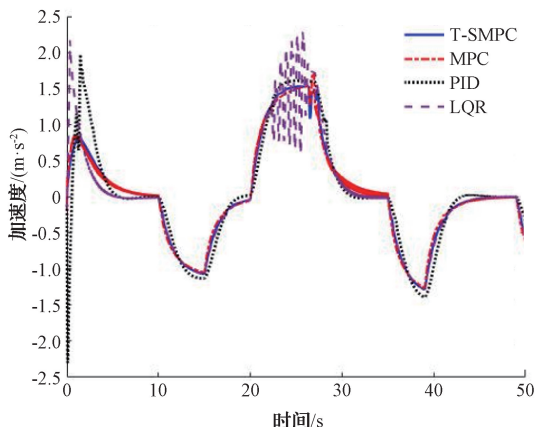


图 7 加速度变化曲线

Fig. 7 Acceleration change curve

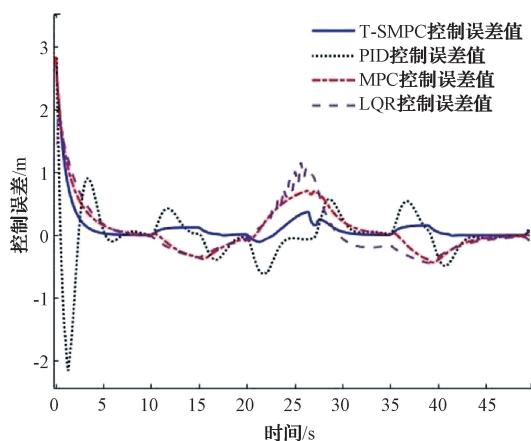


图 8 车间距误差变化曲线

Fig. 8 Variation curve of workshop distance error

结合图 7 和 8 可以看出,在仿真开始时,车间距误差在 2.9 m,4 种控制方式均使车间距误差收敛,由于 PID 控制没有可预见性,为了能更快的减小控制误差,出现了严重的超调现象,而 MPC 和 T-S MPC 控制避免了超调现象。从图 7 可以看出,PID 和 LQR 控制的加速度出现大范围的波动,不仅会影响控制精度,还会影响了车辆稳定性,相比之下,从整个过程来看,T-S MPC 控制的车间距误差变化平稳,控制均方根误差为 0.307 3,而 PID、LQR 和传统 MPC 的均方根误差分别为 0.434 5、0.444 9、0.422 0。综上所述,相比于 PID、LQR 和传统 MPC,T-S MPC 控制精度更高。

### 3) 混合工况

考虑到汽车在行驶过程会遇到前方无车、前方有车和前方车辆紧急制动等工况,依次对应着设计的 3 种模式,因此搭建混合工况,验证控制策略在各种模式切换时的自适应性和控制精度是否符合要求。设置自车初始速度为 22.22 m/s,前车初始速度为 22.22 m/s,两车相距 40 m,仿真时间为 180 s,在 27.8 s 和 61.8 s 时,前车分别切出、切入当前车道。观察速度和控制误差变化,通过与 MPC、PID 和文献[2]的控制策略(PID+LQR)进行对比,验证 T-S MPC 控制算法的自适应性和准确性是否符合要求,仿真结果如图 9 和 10 所示。

结合图 9 和 10 可以看出,在各种模式切换时,4 种控制方法都能快速的响应;在 61.8 s 时,前车切入车道,此时两车相距 8.35 m,期望车间距为 46.67 m,不满足期望车间距要求,3 种控制方法均采取降低车速来保证安全距离,从图 10 可以看出,在模式切换或者前车速度变化较大时,T-S MPC 曲线波动小,因此 T-S MPC 对于车间距响应比 PID、PID+LQR 和传统 MPC 快,适应性好;从整个控制过程来看,T-S MPC 的均方根误差为 2.775 0,而 PID、PID+LQR 和传统 MPC 的均方根误差分别为 3.128 7、4.235 7、3.066 5,相比于 PID、PID+LQR 和传统 MPC,

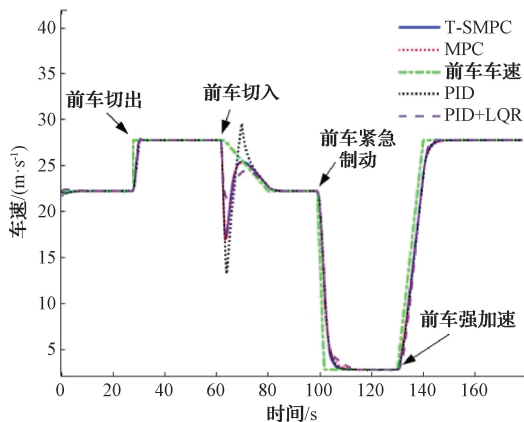


图9 速度变化曲线

Fig. 9 Velocity change curve

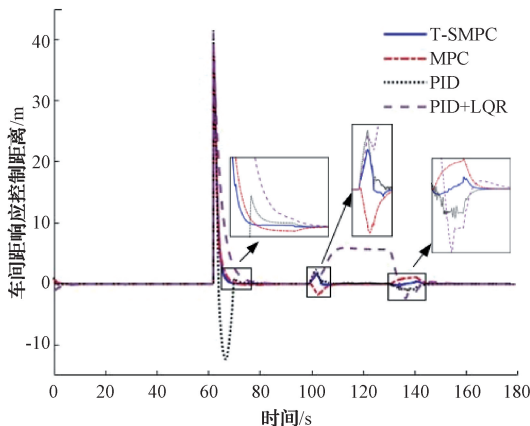


图10 车间距响应控制距离变化曲线

Fig. 10 Curve of variation of distance of workshop from response control

T-S MPC 控制精度更高,准确性更好。

## 5 结论

以加速度为控制目标的 MPC 自适应巡航分层控制器,上层控制器可以根据安全距离模型和切换逻辑,准确地输出期望加速度;下层控制器基于车辆逆动力学模型能够准确的将上层控制器输出的期望加速度转变为节气门开度和制动主缸压力,实现了车辆加速和制动控制。基于 T-S MPC 控制器,与 PID、LQR 和传统 MPC 控制器相比, T-S MPC 控制器在巡航工况、跟随工况和混合工况下控制精度更高,自适应性更强,极大提高了汽车自适应巡航的安全性。

## 参考文献

[1] WANG J, GONG X, WANG P et al. A stochastic predictive adaptive cruise control system with uncertainty-aware velocity prediction and parameter

self-learning [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, DOI: 10.1109/TITS.2024.3402365.

- [2] 杨铭菲,田杰.纯电动汽车自适应巡航控制研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(4):19-26.  
YANG M F, TIAN J. Research on adaptive cruise control for pure electric vehicles [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023,37(4):19-26.
- [3] 刘明春,涂桃,黄菊花,等.基于多模式切换的智能汽车自适应巡航控制研究[J].汽车技术,2020(6):1-7.  
LIU M CH, TU T, HUANG J H, et al. Research on adaptive cruise control for intelligent vehicles based on multi-mode switching [J]. Automotive Technology, 2020(6):1-7.
- [4] 欧健,黄栋,林嘉玉,等.具有紧急制动功能的多模式自适应巡航控制策略[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(3):57-68.  
OU J, HUANG D, LIN J Y et al. Multi-mode adaptive cruise control strategy with emergency braking [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2023,37(3):57-68.
- [5] 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 ZH G et al. Joint simulation study of vehicle adaptive cruise hierarchical control system [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2022(5): 69-72,77.
- [6] 赵林峰,张丁之,王慧然,等.基于改进安全距离模型的人机协同纵向避撞研究[J].汽车工程,2021,43(4):588-600.  
ZHAO L F, ZHANG D ZH, WANG H R et al. Longitudinal collision avoidance study of human-machine cooperation based on improved safety distance model [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(4):588-600.
- [7] 张振军.纯电动汽车自适应巡航控制系统控制策略研究[D].长春:吉林大学,2013.  
ZHANG ZH J. Research on control strategy of adaptive cruise control system for pure electric vehicles [D]. Changchun: Jilin University,2013.
- [8] 吴光强,张亮修,刘兆勇,等.汽车自适应巡航控制系统研究现状与发展趋势[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(4):544-553.  
WU G Q, ZHANG L X, LIU ZH Y, et al. Research status and development trend of automobile adaptive cruise control system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2017, 45 (4):

- 544-553.
- [9] 岳兴莲,刘军. 分布式驱动电动汽车稳定性控制策略优化设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(5): 154-157.
- YUE X L, LIU J. Optimized design of stability control strategy for distributed drive electric vehicles[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(5): 154-157.
- [10] 王世轩,汪怡平,苏楚奇,等. 基于 DMPC 的多车协同自适应巡航控制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(4): 72-79.
- WANG SH X, WANG Y P, SU CH Q et al. Research on multi-vehicle cooperative adaptive cruise control based on DMPC[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(4): 72-79.
- [11] 冯莉,曾辉. 考虑道路坡度的汽车自适应巡航控制策略[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(12): 143-150.
- FENG L, ZENG H. Adaptive cruise control strategy for automobiles considering road gradient[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2023, 42(12): 143-150.
- [12] HUANG L, ZHAI C, WANG H, et al. Cooperative adaptive cruise control and exhaust emission evaluation under heterogeneous connected vehicle network environment in urban city [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 256: 109975.
- [13] 杨泽坤. 基于模型预测的全线控分布式驱动智能车轨迹跟踪控制[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- YANG Z K. Trajectory tracking control of fully line-controlled distributed drive intelligent vehicle based on model prediction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2022.
- [14] 潘公宇,范菲阳,冯鑫. 基于主动悬架的整车车身姿态控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2): 79-88.
- PAN G Y, FAN F Y, FENG X. Research on vehicle body attitude control strategy based on active suspension[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2): 79-88.
- [15] 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 ZH. Research on hierarchical control of vehicle adaptive cruise control system based on MPC algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(3): 53-60.
- [16] 吴其林,沐笑宇,邱明明,等. 前车目标丢失弯道自适应巡航控制策略研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(10): 1824-1832, 1844.
- WU Q L, MU X Y, QIU M M et al. Research on adaptive cruise control strategy for cornering with loss of front vehicle target[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(10): 1824-1832, 1844.
- [17] 温国强,关志伟,赵俊英,等. 智能网联车辆队列协同控制系统构建[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(7): 68-73.
- WEN G Q, GUAN ZH W, ZHAO J Y, et al. Construction of queue cooperative control system for intelligent networked vehicles[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(7): 68-73.

#### 作者简介

刘晓龙, 硕士研究生, 主要研究方向为路径规划、汽车动力学与控制。

E-mail: 1509226350@qq.com

张蕾(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为汽车现代设计、汽车动力学与控制等。

E-mail: zldeng@126.com