

基于多模式切换的智能汽车自适应巡航控制研究*

刘明春^{1,2} 涂桃¹ 黄菊花¹ 宁予²

(1.南昌大学,南昌 330031;2.汉腾汽车有限公司,上饶 334100)

【摘要】针对前车运动状态和驾驶意图的不可预知性导致传统自适应巡航控制(ACC)系统应用受限的问题,设计了一种多模式切换的自适应巡航控制方法。根据自车与前车的运动学关系划分行驶模式,采用紧急系数表征各行驶模式下的危险程度;设计模糊控制器调节模型预测控制(MPC)中目标函数的权重值,以满足不同工况下跟车性和舒适性的需求差异,实现不同控制模式间的切换。仿真结果表明,多模式切换控制方法有效提高了车辆跟车性和舒适性,在各种工况下取得了优良的控制效果。

主题词:自适应巡航控制 多模式切换 模型预测控制 模糊控制 PID

中图分类号:U471.1 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20191442

Study on Adaptive Cruise Control of Intelligent Vehicles Based on Multi-Mode Switching

Liu Mingchun^{1,2}, Tu Tao¹, Huang Juhua¹, Ning Yu²

(1. Nanchang University, Nanchang 330031; 2. Hanteng Automobile Co., Ltd., Shangrao 334100)

【Abstract】A multi-mode switching Adaptive Cruise Control (ACC) method is designed for the problem that the application of traditional ACC system is limited by the unpredictability of movement state and drivers' intention of the vehicle ahead. The driving mode is categorized based on kinematic relationship between your own vehicle and the front vehicle, and the degree of hazard in each driving mode is represented with emergency coefficients. The fuzzy controller is used to adjust weighted value of the objective function in the Model Predictive Control (MPC), as to meet the differentiated requirements for follow and comfort under different driving conditions and achieve the switching between different control modes. The simulation results show that the multi-mode switching control method dramatically improves vehicle following capability and comfort, and gains excellent control under various working conditions.

Key words: Adaptive cruise control, Multi-mode switching, Model predictive control, Fuzzy control, PID

1 前言

自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)系统可根据前车的驾驶状况对汽车的行驶速度进行自动调整。目前,综合考虑安全性、燃油经济性和舒适性的多目标协调ACC系统已经面世^[1-2]。然而,由于汽车行驶工况和周边车辆运动状态难以预测,ACC系统存在频繁加、减速及车速控制不稳定等现象。多模式ACC系统有利于提高车辆在复杂工况下的安全性和舒适性,其核心在于合理的模式划分方法和切换策略。

目前,国内外对ACC系统的模式划分和切换策略

主要基于自车加速度、与前车的相对距离和相对速度等状态变量。美国PATH项目将纵向控制分为驱动控制和制动控制^[3];Fancher等^[4]应用相对车距和相对车速将ACC分为6种工况,但难以通过实车验证来标定工况划分的边界;Canale等^[5]依照前方车辆的行驶状态,把ACC划分为加速、减速和匀速3种模式,并将驾驶员的参考模型融入控制系统,但所设计的控制模式很难满足实际驾驶需要;张德兆等^[6]基于零期望加速度曲线,将ACC分为定速巡航、车距保持、接近前车和超车模式,较好地解决了模式切换中的加速度突变问题,但超车模式隶属于驾驶员操作,不应存在于系统自动驾驶模式中;高振

*基金项目:国家自然科学基金项目(51605124)。

海等^[7]根据自车的加速度将ACC分为巡航、稳态跟随和瞬态跟随模式,但并未充分考虑前车加速度变化对ACC系统的影响;孙晓文等^[8]将ACC系统分为巡航速度控制和跟车距离控制2种模式,提出的控制策略能够保证ACC车辆的行车安全,但在车距与车速模式之间切换时,加速度会在短时间内超出期望值,降低了舒适性。

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,本文提出一种基于多模式切换的ACC策略。根据自车与前车的运动关系,基于模糊逻辑划分ACC的工作模式,在定速巡航模式中,通过PID控制算法实现对设定速度的跟随,在跟车模式中,采用模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)算法求解期望跟车加速度,安全、舒适地跟随前车。最后通过多种仿真工况验证所提出的ACC系统控制策略的有效性。

2 自适应巡航控制模式定义

根据前方是否存在有效目标,将车辆自适应巡航工况分为巡航和跟车2种场景,进一步根据模糊控制将纵向工况分为5种模式,如图1所示。引入紧急系数 i_m 衡量车辆行驶模式中的紧急程度, i_m 为[0,1]范围内的无量纲系数, $i_m=0$ 代表紧急程度最低, $i_m=1$ 代表紧急程度最高。本文针对不同的自适应巡航行驶模式设置了相应的紧急系数取值范围,见表1。

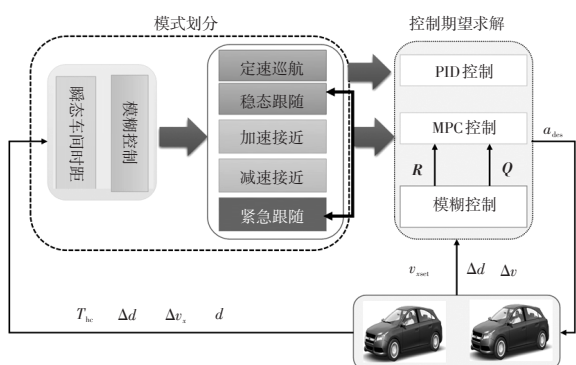


图1 ACC系统总体框架

表1 车辆自适应巡航行驶模式

场景	模式	判断依据	紧急系数 i_m	控制方法
巡航	模式1 定速巡航	不受前车影响	[0.0, 0.2)	PID
跟车	模式2 加速接近前车	受到前车影响	[0.2, 0.4)	MPC
	模式3 稳态跟车		[0.4, 0.6)	
	模式4 减速接近前车		[0.6, 0.8)	
	模式5 紧急跟车		[0.8, 1.0]	

3 基于多模式切换的ACC系统设计

针对前述ACC模式,本文设计的控制策略如图1所示。车头时距 t_h 指在同一车道上行驶的车辆队列中,连

续两车辆车头端部通过某一断面的时间间隔, t_h 的临界值为临界车间时距 T_{hc} 。模式划分模块根据 T_{hc} 、两车之间的动态信息(包括车辆实际间距 d 、间距误差 Δd 、相对速度 Δv_x)基于模糊逻辑进行模式划分,以适应复杂的动态交通系统。控制期望求解模块根据不同的控制模式采取相应的算法求解满足安全性、舒适性需求的期望自车加速度 a_{des} ,作用于被控车辆,实现ACC系统的功能。

3.1 基于PID的定速巡航模式控制

定速巡航模式下,采用PID算法计算期望加速度:

$$a_{des} = k_p(v_{xset} - v_x) + k_i \int (v_{xset} - v_x) dt + k_d \frac{d}{dt}(v_{xset} - v_x) \quad (1)$$

式中, k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例项、积分项、微分项系数; v_{xset} 为驾驶员设定的巡航车速; v_x 为车辆纵向速度。

3.2 基于MPC的跟车模式控制

3.2.1 纵向跟车运动学建模

在ACC系统中,实际加速度和期望加速度满足一阶惯性时滞关系^[9-10]:

$$a_x(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau}\right) a_x(k) + \frac{T_s}{\tau} a_{xdes}(k) \quad (2)$$

式中, τ 为惯性时间常数; T_s 为系统的采样周期; a_{xdes} 为上层控制算法求解得到的期望加速度; a_x 为车辆实际纵向加速度; k 为采样点序号。

纵向跟车运动学模型如图2所示。根据车间纵向运动学关系,有如下关系式:

$$d(k+1) = d(k) + \Delta v_x(k) T_s + \frac{1}{2} [a_{px}(k) - a_x(k)] T_s^2 \quad (3)$$

$$\Delta v_x(k+1) = \Delta v_x(k) + [a_{px}(k) - a_x(k)] T_s \quad (4)$$

$$v_x(k+1) = v_x(k) + a_x(k) T_s \quad (5)$$

$$a'_x(k+1) = -\frac{1}{\tau} a_x(k) + \frac{1}{\tau} a_{xdes}(k) \quad (6)$$

式中, v_{px} 为前车的纵向速度; a_{px} 为前车的纵向加速度; a'_x 为自车加速度变化率。

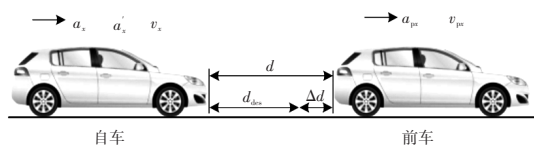


图2 车辆纵向跟车运动学模型

选取状态变量 $\mathbf{x}(k) = [d(k) \ \Delta v_x(k) \ v_x(k) \ a_x(k) \ a'_x(k)]^T$, 控制变量 $u(k) = a_{xdes}(k)$, 以前车加速度作为干扰, 即 $w(k) = a_{px}(k)$ 。ACC系统控制两车间距趋近于期望间距, 同时自车速度趋近于前车速度, 定义系统的输出变量为 $\mathbf{y} = [\Delta d(k) \ \Delta v_x(k)]^T$, 期望车间距 $d_{des} = t_h \cdot v_x + r_0$, 可以根据恒定车头时距策略^[11]得到, 其中, r_0 为最小固定车间距。综上, 可以得到ACC系统的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{G}w(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{z} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{式中, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & 0 & -\frac{1}{2}T_s^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -T_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T_s}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{T_s}{\tau} \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T_s^2 \\ T_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -t_h & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{z} = \begin{bmatrix} -r_0 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

3.2.2 预测方程与目标函数

MPC算法可以预测未来 p 时刻内两车间距和相对速度,并将该预测值与期望值进行比较,求得最优控制序列。假设系统状态可以通过测量得到,并设定以下条件:

- 假定 p 为预测时域, m 为控制时域,满足 $p \geq m$ 。
- 假设控制时域之外控制量不变,即:

$$u(k+m-1)=u(k+m)=\dots=u(k+p-1) \quad (8)$$

- 假设外部干扰在预测时域内保持不变,即:

$$\mathbf{W}(k)=[w(k|k) \ w(k|k) \ \dots \ w(k|k)]^T \quad (9)$$

由此,定义 m 步的控制输入向量为:

$$\mathbf{U}(k)=[u(k|k) \ u(k+1|k) \ \dots \ u(k+m-1|k)]^T \quad (10)$$

定义 p 步内系统的预测输出矩阵为:

$$\mathbf{Y}_p(k+1|k)=[\mathbf{y}_p(k+1|k) \ \mathbf{y}_p(k+2|k) \ \dots \ \mathbf{y}_p(k+p|k)]^T \quad (11)$$

根据式(7),得到预测方程具体的表达形式为:

$$\mathbf{Y}_p(k+1|k)=\mathbf{S}_x\mathbf{x}(k)+\mathbf{S}_w\mathbf{W}(k)+\mathbf{S}_u\mathbf{U}(k)+\mathbf{Z} \quad (12)$$

$$\text{式中, } \mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^p \end{bmatrix}; \mathbf{S}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{CG} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CAG} & \mathbf{CG} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1}\mathbf{G} & \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{G} & \dots & \mathbf{CG} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{S}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{p-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{p-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{CB} \end{bmatrix}; \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{z} \\ \vdots \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}。$$

与式(11)相对应,参考输入应在整个预测时域 p 内实时更新,定义参考输入序列为:

$$\mathbf{R}(k+1|k)=[r(k+1) \ r(k+2) \ \dots \ r(k+p)]^T \quad (13)$$

式中, $r(k)$ 为参考输入量。

本文研究主要针对稳定跟车性能和舒适性。稳定跟车性能需满足两车间距为期望间距,且本车与前车速度一致,舒适性由加速度进行评价。定义目标函数为:

$$J(\mathbf{Y}_p(k), \mathbf{U}(k), m, p) = \|\mathbf{Q}(\mathbf{Y}_p(k+1|k) - \mathbf{R}(k+1|k))\|^2 + \|\mathbf{P}\mathbf{U}(k)\|^2 \quad (14)$$

式中, $\mathbf{Q}=\text{diag}(q_{\Delta d}, q_{\Delta v}, q_{\Delta a}, q_{\text{jerk}})$; $q_{\Delta d}$ 为车间距误差的权重因子,其值越大,两车的实际车间距越接近于安全车间距

模型计算的期望车间距; $q_{\Delta v}$ 、 $q_{\Delta a}$ 、 q_{jerk} 分别为两车的相对速度、本车加速度以及加速度变化率的权重因子,权重因子越大,相应变量的值越小; $\mathbf{P}=\text{diag}(p_a, p_{\text{jerk}})$,其选取影响控制量,即MPC控制器决策出的期望加速度及其增量,值越小,对应的控制量越大。

本文综合考虑跟车性、舒适性与燃油经济性,为提升对不同交通场景的适应性,选取不同权值,令跟车性权重系数 $\Gamma_v=q_{\Delta d}=q_{\Delta v}$,舒适性权重系数 $\Gamma_u=q_{\Delta a}=q_{\text{jerk}}$ 。

定义与控制序列无关的向量:

$$\mathbf{E}_p(k+1|k)=\mathbf{R}(k+1)-\mathbf{S}_x\mathbf{x}(k)-\mathbf{S}_w\mathbf{W}(k)-\mathbf{Z} \quad (15)$$

可推导出:

$$J = \|\mathbf{Q}(\mathbf{S}_u\mathbf{U}(k) - \mathbf{E}_p(k+1|k))\|^2 + \|\mathbf{P}\mathbf{U}(k)\|^2$$

$$= \mathbf{U}(k)^T(\mathbf{S}_u^T\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{S}_u + \mathbf{P}^T\mathbf{P})\mathbf{U}(k) - 2\mathbf{E}_p(k+1|k)^T\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{S}_u\mathbf{U}(k) + \mathbf{E}_p(k+1|k)^T\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{E}_p(k+1|k) \quad (16)$$

忽略控制量无关项 $\mathbf{E}_p(k+1|k)^T\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{E}_p(k+1|k)$,进一步推导出:

$$J = \mathbf{U}(k)^T\mathbf{H}\mathbf{U}(k) - \mathbf{G}(k+1|k)^T\mathbf{U}(k) \quad (17)$$

式中, $\mathbf{H}=\mathbf{S}_u^T\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{S}_u + \mathbf{P}^T\mathbf{P}$; $\mathbf{G}(k+1|k)^T=2\mathbf{S}_u^T\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{E}_p(k+1|k)$ 。

3.2.3 约束条件

3.2.3.1 安全性

两车间距大于安全车距 d_c :

$$d \geq d_c \quad (18)$$

3.2.3.2 跟踪性

稳态跟车时,两车间距趋近于期望间距,相对速度趋近于0:

$$d \rightarrow d_{\text{des}}, \Delta v_i(k) \rightarrow 0 \quad (19)$$

3.2.3.3 舒适性

大量针对驾驶员的主观评价与行车数据表明,车辆加速度在 $-2 \sim 2 \text{ m/s}^2$ 范围内可以保证较好的舒适性^[12-13]。因此,文本选取本车加速度 $a_x(k)$ 作为ACC系统舒适性的量化表征参数,并对其进行如下约束:

$$a_{x\min} \leq a_x(k) \leq a_{x\max} \quad (20)$$

式中, $a_{x\min}$ 、 $a_{x\max}$ 分别为最小、最大加速度。

3.2.3.4 经济性

车辆速度变化越平缓,燃油经济性越高,因此对自车的控制变量,即期望加速度进行限制:

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \quad (21)$$

式中, u_{\min} 、 u_{\max} 分别为控制变量的最小、最大值。

3.2.3.5 速度

考虑到自车的能力限制和交通法规的限制,车辆行驶过程中还需要满足速度约束:

$$v_{x\min} \leq v_x(k) \leq v_{x\max} \quad (22)$$

式中, $v_{x\min}$ 、 $v_{x\max}$ 分别为最小、最大车速。

3.2.4 约束及目标函数处理

定义约束条件下的输出 $y_b(k)$ 为系统的5个状态,即:

$$y_b(k)=C_b x(k) \quad (23)$$

式中, $C_b=diag(1,1,1,1,1)$ 为状态空间方程系数矩阵。

基于式(23),定义约束条件下的输出为矩阵形式:

$$Y_b(k+1|k)=[y_b(k+1|k) \ y_b(k+2|k) \ \cdots \ y_b(k+p|k)]^T \quad (24)$$

与预测方程式(12)一致,得到约束条件下的预测方程表达式为:

$$Y_b(k+1|k)=S_{xb}x(k)+S_{wb}W(k)+S_{ub}U(k)+Z_b \quad (25)$$

$$\text{式中, } S_{xb}=\begin{bmatrix} C_b A \\ C_b A^2 \\ \vdots \\ C_b A^p \end{bmatrix}; S_{wb}=\begin{bmatrix} C_b G & 0 & \cdots & 0 \\ C_b A G & C_b G & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_b A^{p-1} G & C_b A^{p-2} G & \cdots & C_b G \end{bmatrix};$$

$$S_{ub}=\begin{bmatrix} C_b B & 0 & \cdots & 0 \\ C_b A B & C_b B & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_b A^{p-1} B & C_b A^{p-2} B & \cdots & C_b B \end{bmatrix}; Z_b=\begin{bmatrix} z \\ z \\ \vdots \\ z \end{bmatrix} \circ$$

定义系统输出的约束条件为:

$$Y_{bmin} \leq Y_b(k+1|k) \leq Y_{bmax} \quad (26)$$

$$\text{式中, } Y_{bmin}=\begin{bmatrix} y_{bmin} \\ \vdots \\ y_{bmin} \end{bmatrix}_{p \times 1}; Y_{bmax}=\begin{bmatrix} y_{bmax} \\ \vdots \\ y_{bmax} \end{bmatrix}_{p \times 1};$$

$$y_{bmax}=\begin{bmatrix} d_c & -\infty & v_{xmin} & a_{xmin} & a'_{xmin} \end{bmatrix}^T;$$

$$y_{bmin}=\begin{bmatrix} \infty & \infty & v_{xmax} & a_{xmax} & a'_{xmax} \end{bmatrix}^T \circ$$

同理,定义控制变量的约束为:

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} U(k) \geq \begin{bmatrix} -U_{max} \\ U_{min} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\text{式中, } I=diag(1 \ \cdots \ 1)_{m \times m}; U_{min}=\begin{bmatrix} u_{min} \\ \vdots \\ u_{min} \end{bmatrix}_{m \times 1}; U_{max}=\begin{bmatrix} u_{max} \\ \vdots \\ u_{max} \end{bmatrix}_{m \times 1} \circ$$

3.2.5 约束软化

考虑到上述输出变量和控制变量的硬约束可能导致优化求解过程中出现无可行解的情况,引入向量松弛因子来软化硬约束^[14-15],并将性能指标函数和约束条件进行预测型转化,转化为求解带有约束的二次规划问题:

a. 增加系统输出约束的软化因子 s_{ymin} 和 s_{ymax} :

$$s_{ymin}=[s_{\Delta dmin} \ s_{\Delta v_{xmin}} \ s_{exmin} \ s_{axmin} \ s_{a'xmin}]^T \quad (28)$$

$$s_{ymax}=[s_{\Delta dmax} \ s_{\Delta v_{xmax}} \ s_{exmax} \ s_{axmax} \ s_{a'xmax}]^T \quad (29)$$

式中, $s_{\Delta dmin}$ 、 $s_{\Delta v_{xmin}}$ 、 s_{exmin} 、 s_{axmin} 、 $s_{a'xmin}$ 、 $s_{\Delta dmax}$ 、 $s_{\Delta v_{xmax}}$ 、 s_{exmax} 、 s_{axmax} 、 $s_{a'xmax}$ 分别为系统状态变量的硬约束最小值、最大值的松弛系数。

b. 增加系统控制约束的软化因子 s_{umin} 和 s_{umax} :

$$u_{min}+\varepsilon s_{umin} \leq u(k) \leq u_{max}+\varepsilon s_{umax} \quad (30)$$

软化后的约束不能被无限放大,在目标函数式(17)

中增加代价函数 \bar{J} ,对松弛因子进行限制:

$$\bar{J}=J+\varepsilon^T \gamma \varepsilon \quad (31)$$

式中, $\varepsilon=[\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3]^T$ 为向量松弛因子,限制软化后的输出约束和控制约束, $\varepsilon_1=0, \varepsilon_2 \geq 0, \varepsilon_3 \geq 0; \gamma=diag(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ 为惩罚矩阵系数,调节目标性能的权重, $\gamma_1>0, \gamma_2>0, \gamma_3>0$ 。

优化问题式(31)可转化为求解约束条件下的二次规划问题,将式(31)写成标准二次型约束优化问题,得到:

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \bar{U}^T \bar{H} \bar{U} - \bar{G}_p \bar{U} \right\} \quad (32)$$

$$\text{s.t. } C_u \bar{U} \geq b$$

$$\text{式中, } \bar{H}=\begin{bmatrix} H \\ 2\gamma \end{bmatrix}; \bar{G}_p=[G_p \ 0]; \bar{U}=[U(k) \ \varepsilon]^T;$$

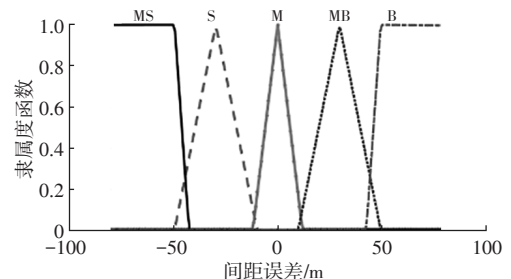
$$C_u=\begin{bmatrix} S_{wb} & -s_{ymin} & 0 \\ -S_{ub} & s_{ymax} & 0 \\ -I & 0 & -s_{umin} \\ I & 0 & -s_{umax} \end{bmatrix}; b=\begin{bmatrix} Y_{bmin}-S_{xb}x(k)-S_{wb}W(k) \\ S_{xb}x(k)+S_{wb}W(k)-Y_{bmax} \\ -U_{max} \\ U_{min} \end{bmatrix} \circ$$

4 基于模糊规则的跟车性能调节及模式切换

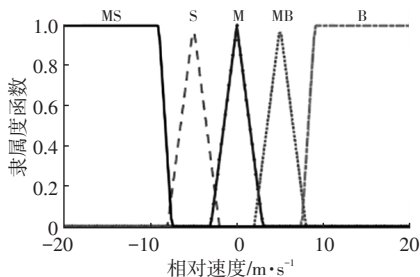
由于实际驾驶环境复杂多变,单一跟车模式的控制参数无法满足车辆实际行驶工况。车辆控制参数需要在稳定跟车性能与舒适性之间进行调节,此外,不同的跟车模式对应不同的紧急系数。本文基于自车与前车的车间距误差 Δd 和相对速度 Δv_x 设计模糊规则,一方面调节目标函数式(14)中的权重系数 Γ_v 和 Γ_a ,以调节跟车过程中舒适性和跟车性的权重,另一方面计算跟车过程中的紧急系数 i_m ,切换跟车模式。性能权重系数与跟车紧急系数密切相关:在紧急系数高的模式下,应当以稳定跟车性能为主,以保证跟车安全性;在紧急系数低的情况下,应当以舒适性能为主,以保证跟车舒适性。

4.1 输入变量模糊化

模糊控制器的输入为 Δd 和 Δv_x 。将 Δd 模糊化为MS(微小)、S(小)、M(中)、MB(较大)、B(大)5个集合,并设定其变化范围为 $[-80, 80]$ m;将 Δv_x 也分为MS(微小)、S(小)、M(中)、MB(较大)、B(大)5个等级,本文设定车速范围为 $[0, 120]$ km/h, Δv_x 的模糊论域变化范围为 $[-20, 20]$ m/s。输入变量 Δd 和 Δv_x 的隶属度函数如图3所示。



(a) 间距误差

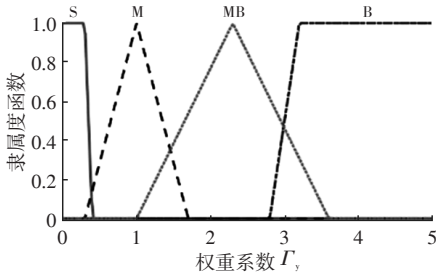


(b)相对速度

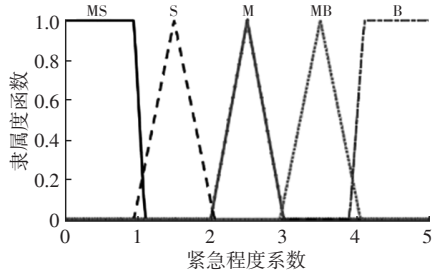
图3 输入变量隶属度函数

4.2 输出变量模糊化

模糊控制器的输出为权重系数 Γ_y 和 Γ_u ,以及紧急系数 i_m 。 Γ_y 和 Γ_u 具有相对意义,在此将 Γ_u 固定为1,调节 Γ_y 。将 Γ_y 模糊化为S(小)、M(中)、MB(较大)、B(大)4个集合,变化范围为[0,5]。将紧急系数 i_m 模糊化为MS(微小)、S(小)、M(中)、MB(较大)、B(大)5个集合,变化范围为[0,1],其 Γ_y 和 i_m 的隶属度函数如图4所示。



(a)权重系数



(b)紧急程度系数

图4 输出变量隶属度函数

4.3 模糊规则设计

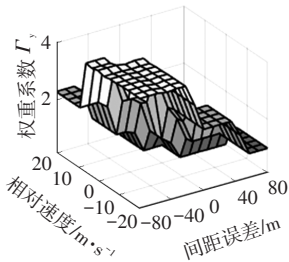
根据交通场景分析,如果两车间距远大于期望间距,则 Δd 处于B(大)论域,无论 Δv_x 如何变化,都认为二者处于相对安全的区域,此时适当提高舒适性的权重,跟车性的权重则相对降低,即 Γ_y 处于MS(微小)论域或者S(小)论域,且随着相对速度的增加,该值处于论域S(小)的可能性增加。如果两车间距在期望间距附近, Δd 处于M(中)论域,则随着 Δv_x 的增大,两车间的距离会越来越大,对于跟车性的要求则越来越低;相反,如果后车车速大于前车,二者间距会越来越小,危险程度则越来越高。因此,随着 Δv_x 的增大, Γ_y 由MB(较大)逐渐向S

(小)过渡。如果两车间距较小, Δd 处于MS(微小)论域,而后车的速度大于前车,相对速度 Δv_x 处于MS(微小)论域,则车辆行驶状况较为紧急,因此稳定跟车性能成为首要考虑的因素, Γ_y 由B(大)逐渐向MB(较大)过渡。综上,设计模糊控制器的模糊规则如表2所示。

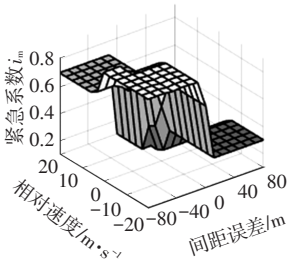
表2 权重系数调节模糊控制规则表

Γ_y, i_m		Δv_x				
		MS	S	M	MB	B
Δd	MS	B B	B B	B B	B MB	MB MB
	S	B B	B B	B MB	MB MB	M MB
	M	MB MB	MB MB	M M	M S	S MS
	MB	MB S	M S	S S	S MS	S MS
	B	M S	M S	S MS	S MS	S MS

采用重心法将模糊规则进行解模糊化运算,分别得到 Γ_y 和 i_m 关于 Δd 和 Δv_x 的三维曲面图,如图5所示。基于上述模糊规则,可以基于 Δd 和 Δv_x 得到 Γ_y 和 i_m ,完成跟车性能调节和跟车模式切换。



(a) Γ_y



(b) i_m

图5 输入-输出变量的三维曲面图

5 控制系统仿真及分析

本文通过多种工况下的仿真验证所设计的多模式ACC策略的有效性。系统主要控制参数如表3所示。

表3 控制系统主要参数

参数	取值	参数	取值
采样周期 T/s	0.2	最小车速 $v_{\min}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	0
车头时距 t_h/s	1	最大车速 $v_{\max}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	120
最小车间距 r_0/m	7	最小加速度 $a_{\min}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	-2
最小安全距离 d/m	7	加最大速度 $a_{\max}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	2
临界车头时距 T_{hc}/s	5		

5.1 工况1:前车变速

设前车开始以40 km/h匀速行驶,在第70 s加速至60 km/h匀速行驶,再减速至40 km/h后匀速行驶,自车与前车初始车距为300 m,以60 km/h接近前车,仿真结果如图6所示。其中,自车的状态由自车运动方程计算得到,前车的状态由基于自车的传感器测量得到。

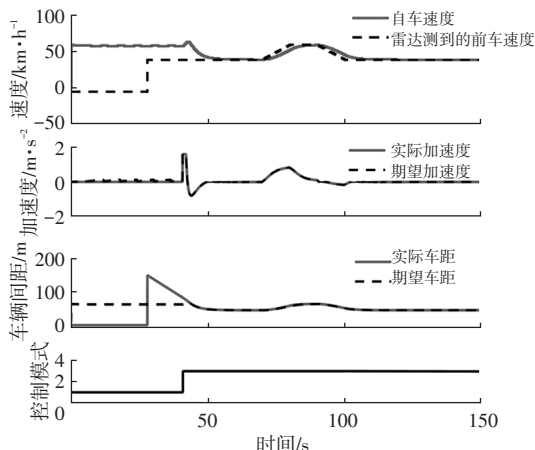


图6 前车变速工况ACC仿真结果

图6中,前车速度和实际车距在第27 s前显示为0,这是由于自车传感器的最大检测距离为150 m,该时间段内前车不在自车的检测范围内,车辆工作在模式1。第27 s时,实际车距为150 m,前车进入自车传感器的检测范围。第40 s后自车与前车距离为期望车间距,车辆工作在模式3,由MPC控制器求解得到的自车实际加速度可以很好地跟踪期望加速度,且跟车过程加速度变化较平顺,保证了较好的舒适性。与此同时,自车速度从60 km/h平稳地降低到40 km/h后跟随前车行驶,并将实际车距保持在期望车间距以保证较好的跟车性能。

5.2 工况2:前车切出

设前车以40 km/h匀速行驶,自车与前车初始距离为100 m,自车车速60 km/h向行驶,前车第25 s时切出当前车道,换道至旁侧车道,仿真结果如图7所示。

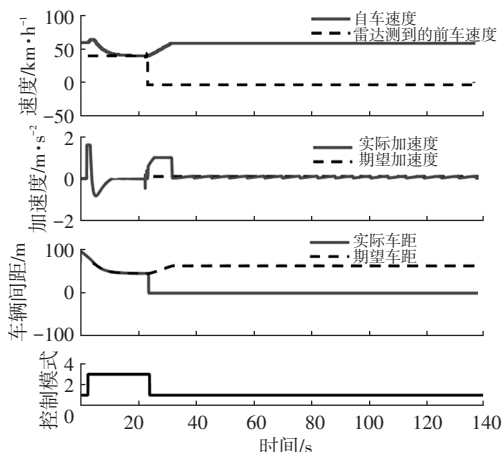


图7 前车切出工况ACC仿真结果

由图7可知:仿真开始后,自车传感器迅速检测到前车,在第25 s前减速逐渐接近前车,并稳定跟随前车(跟车模式3);第25 s时前车切出当前车道,不在自车传感器检测范围内,故此时的前车速度和车辆间距为0;第25 s后车辆恢复工作模式1,自车速度逐渐恢复至设定车速60 km/h。自车加速度由MPC控制器计算得到,车辆在第25 s前减速接近前车,以及第25~33 s加速恢复至设定速度的过程中,加速度都在 $[-1,1]$ m/s²范围内,保持了较好的舒适性。

5.3 工况3:前车切入

设置前车在旁侧车道以40 km/h匀速行驶,自车以60 km/h匀速行驶,与前车相距200 m,第6 s时前车从旁侧车道切入自车所在车道,仿真结果如图8所示。

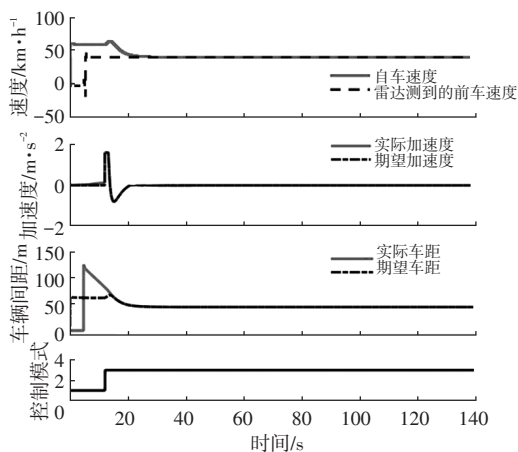


图8 前车切入工况ACC仿真结果

由图8可知:在第6 s时前车切入自车所在车道后,由于距离较远,自车并未立即减速,ACC系统工作在模式1;当与前车距离在第13 s达到期望车间距65 m后,自车开始减速;当自车速度在第25 s减速至40 km/h与前车一致后,便以该速度稳定跟随前车行驶,ACC系统工作于模式3。自车加速度变化情况由MPC控制器计算得到,车辆在第13 s时开始减速,且减速过程中减速度逐渐收敛至0,保持了较好的舒适性。

5.4 工况4:NEDC-市郊工况

新欧洲行驶循环(New European Driving Cycle, NEDC)工况包括车辆行驶的典型市区工况和市郊工况,本文选取NEDC中的市郊工况验证ACC系统的有效性。在仿真过程中,自车与前车在同一车道上行驶;仿真开始时前车静止,自车以60 km/h驶向前车;第10 s时前车启动,并根据NEDC中的市郊工况控制车速,自车在ACC系统的控制下跟随前车行驶。仿真结果如图9所示。

由图9可知,在第10 s时,自车与前车相距150 m,前车进入自车传感器的检测范围,但由于距离较远,自

车并未减速,仍工作在定速巡航模式;第20 s时,车间距为65 m,自车在ACC系统的作用下开始减速,并在第25 s时减速至与前车速度一致;之后自车稳定地跟随前车加速和减速,ACC系统工作在模式3,即稳态跟车模式。由图9可知,整个工况中自车加速度基本在 $[-1,2]$ m/s^2 范围内,保持了较好的跟车舒适性。

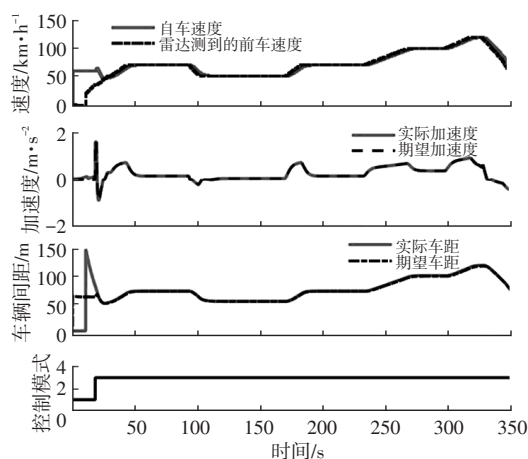


图9 NEDC-市郊工况ACC仿真结果

6 结束语

本文针对复杂工况下智能汽车自适应巡航控制的问题,设计了一种基于多模式切换的自适应巡航控制方法。基于车辆纵向跟车运动学关系,划分了自适应巡航过程中的行驶模式,并采用紧急系数表征各行驶模式下的危险程度,较完整地描述车辆纵向跟车过程中的ACC各种工作模式。采用PID控制算法进行定速巡航模式下的控制;采用MPC算法进行跟车模式下的控制,并设计了模糊控制器调节MPC中性能指标函数的权重值,同时计算不同跟车状态下的紧急系数,实现了不同工况下稳定跟车性能和舒适性的协调,以及ACC不同控制模式之间的切换。多种工况下的仿真结果表明,所设计的多模式切换控制方法有效实现了车辆在各种工况下的跟车性能和舒适性的协调,取得了优良的控制效果。

参考文献

- [1] 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(04):544-553.
- [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):18-21.
- [3] IOANNOU P, XU Z. Throttle and Brake Control Systems for Automatic Vehicle Following[J]. Journal of Intelligent Transportation, 1994, 1(4): 345-377.
- [4] BAREKET Z, FANCHER P S, PENG H, et al. Methodology

- for Assessing Adaptive Cruise Control Behavior[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2003, 4(3): 123-131.
- [5] CANALE M, MALAN S, MURDOCCO V. Personalization of ACC Stop and Go Task Based on Human Driver Behavior Analysis[C]// The 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002. IFAC, 2002: 1126-1131.
- [6] 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.
- [7] 高振海,严伟,王竣,等.自适应巡航控制系统的仿驾驶人模式切换逻辑[C]//2015中国汽车工程学会年会论文集(Volume2).北京:机械工业出版社,2015:41-44.
- [8] 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.
- [9] BAGESHWAR V L, GARRARD W L, RAJAMANI R. Model Predictive Control of Transitional Maneuvers for Adaptive Cruise Control Vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(5): 1573-1585.
- [10] MARTINEZ J J, CANUDAS-DE-WIT C. A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scenarios[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(2): 246-258.
- [11] CHEHARDOLI H, GHASEMI A. Adaptive Centralized/Decentralized Control and Identification of 1-D Heterogeneous Vehicular Platoons Based on Constant Time Headway Policy[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(10): 3376-3386.
- [12] MOON S, YI K. Human Driving Data-Based Design of a Vehicle Adaptive Cruise Control Algorithm[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8): 661-690.
- [13] YI K, RYU N, YOON H J, et al. Implementation and Vehicle Tests of a Vehicle Stop-and-Go Cruise Control System[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2002, 216(7): 537-544.
- [14] GARCIA C E, PRETT D M, MORARI M. Model Predictive Control: Theory and Practice- a Survey[J]. Automatica, 1989, 25(3): 335-348.
- [15] 李升波,王建强,李克强,等.MPC实用化问题处理及在车辆ACC中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(5):645-648.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2020年1月29日。