

汽车 ACC 系统可变输出论域模糊控制算法*

王斌^{1,2}, 王仁广², 何玮³, 吴利军¹, 刘昭度³

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国汽车技术研究中心汽车工程研究院, 天津 300162; 3. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要: 基于模糊控制理论设计了自适应巡航控制(ACC)分层控制器,并根据车辆的实际行驶特性确定 ACC 节气门调节模式和制动干预模式的切换条件,设计了 ACC 可变输出论域模糊控制算法,并进行了 ACC 典型工况的仿真。仿真结果表明控制算法满足乘坐舒适性和保持安全车距的要求。

关键词: 汽车; 自适应巡航控制; 模糊控制; 可变输出论域

中图分类号: U491.6; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)02-0465-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.02.016

Fuzzy control algorithm on variable output domain in automotive ACC system*

WANG Bin^{1,2}, WANG Ren-guang², HE Wei³, WU Li-jun¹, LIU Zhao-du³

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety & Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Automotive Engineering Research Institute, China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300162, China; 3. School of Mechanical & Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the fuzzy control algorithm, this paper designed the layered configuration of ACC fuzzy controller. In addition, established the switch condition of the throttle regulation mode and braking interference mode according to the real specialities of vehicle during the ACC control. Furthermore, introduced the fuzzy control algorithm on variable output domain to design of ACC upper controller. And simulated the ACC typical working conditions. The results of emulation test show that the control strategy meets the requirements of ride comfort and safe distance of vehicles.

Key words: automotive; adaptive cruise control(ACC); fuzzy control; variable output domain

汽车自适应巡航控制(ACC)系统是一种先进的主动安全系统。它能根据车距传感器信息自动调节节气门开度或制动力矩,控制车速变化,以保持本车与前车以安全车距行驶。国外对 ACC 已进行了比较深入的研究,且已经开发出并在某些高档轿车上安装了 ACC。目前,国内还不具有 ACC 技术的自主知识产权,开发适合我国国情的 ACC 系统具有重要意义。在 ACC 技术中,选取适当的控制策略、模拟驾驶员判断作出相应的控制决策量是实现 ACC 跟随控制的关键。

1 ACC 模糊控制器总体结构

为确保控制算法的实时性与可靠性,ACC 采用分层控制结构,分上位模糊控制器和下位执行控制器,如图 1 所示。车载雷达将相对车速信号 v_r 、相对车距 d_r 与安全车距 d_s 的偏差 $d_r - d_s$ 输入上位控制器。上位控制器采用模糊控制策略,经过模糊化、模糊决策推理和解模糊的过程,生成主车理想加速度 α_{des} 。经过模式转换后,下位控制器件采用 PID/模糊混合控制算法对于理想加速度生成的期望车速 v_{des} 进行跟随。下位控制器控制方式是通过主动制动压力调节和节气门开度调节实现

控制目标。与不分层的直接控制结构相比,分层结构将控制器的功能分配给不同的控制模块,便于从控制系统总体要求的角度明确各模块的设计目的。本文主要讨论 ACC 上位模糊控制器的算法设计。

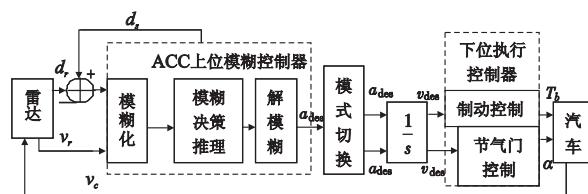


图1 ACC模糊控制器结构框图

2 上位控制器模糊控制结构

2.1 输入输出隶属度函数

本文以相对车距偏差 e_d 和相对车速 v_r 为输入语言变量。依据我国高速公路安全车距要求和车载雷达测量范围,设定 e_d 的论域为 $[-100, 250]$ 。由高速公路车速数据分析,设定 v_r 的论域为 $[-20, 20]$ 。输入语言变量的模糊子集均分为七级: $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。隶属度函数在论域中间区域

收稿日期: 2009-05-07; 修回日期: 2009-08-09 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50122155); 中国博士后基金资助项目(20070420337)

作者简介: 王斌(1977-),男,湖南常德人,高级工程师,博士后,主要研究方向为车辆信息技术、电动汽车(wangbin_auto@sina.com);王仁广(1968-),男,山东平度人,副教授,博士,主要研究方向为车辆制动安全技术;何玮(1980-),男,四川广元人,工程师,博士,主要研究方向为车辆自适应巡航技术;吴利军(1972-),女,河北石家庄人,副教授,主要研究方向为车辆主动安全技术;刘昭度(1949-),男,安徽阜阳人,教授,博导,主要研究方向为车辆安全技术。

采用简单的三角形函数,在 NB 与 PB 区域使用梯形隶属函数。量化因子 k_{ed} 、 k_{vr} 均为 1。图 2 为输入语言变量隶属度函数。

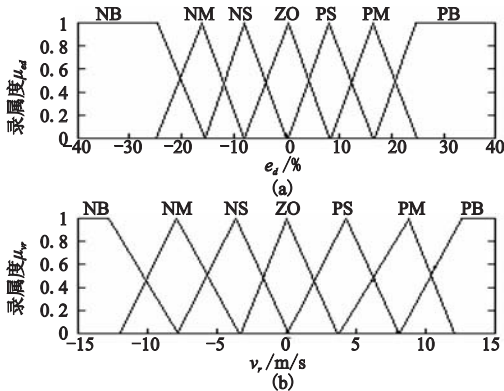


图2 输入语言变量的隶属度函数

e_d 、 v_r 的相关定义和说明如下:

$$e_d = \frac{d_r - d_s}{d_s} \times 100\% \quad (1)$$

其中: e_d 为相对车距偏差(%); d_r 为主车与目标车辆实际距离(m); d_s 为理想安全车距(m)。

采用基于恒定车间时距的安全车距模型^[1],其安全车距表达式为

$$d_s = v_p T_{set} + d_0 \quad (2)$$

其中: T_{set} 为驾驶员设定的车间时距(s); v_p 为目标车辆车速(m/s); d_0 为常数,一般取为0~5 m^[2]。车间时距过小可能使安全隐患加大,过大则使其他车辆容易并线,导致主车过于频繁地加减速,影响乘坐舒适性。安全时距一般限定在1~2 s^[3]。

$$v_r = v_p - v_c \quad (3)$$

其中: v_c 为主车车速(m/s); v_p 参数意义同前。

选择期望加速度 a_{des} 为输出语言变量。从高速公路上实车实验的数据分析可知,正常行车时 ACC 主车的加速度变化一般在 $-2.5 \text{ m/s}^2 \sim 1.5 \text{ m/s}^2$ 。在极少数紧急制动工况减速度会大于 2.5 m/s^2 ,属于 ACC 控制中的极限工况,如果仅考虑舒适性在极限工况下就会有发生碰撞事故的可能。如果不设定舒适度限制,定为 $[-5.8, 1.5]$,系统安全性得到了保证,但期望加速度结果普遍较大,有悖于舒适性要求。因此,从舒适性和安全性角度设置 a_{des} 为 $[-2.5, 1.5]$ 、 $[-5.8, 1.5]$ 。基于以上范围设定输出变量论域分别为 $[-4, 2.5]$ 、 $[-8, 4]$,并将对应的模拟子集分为 9 级,简记为 {NVB, NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB, PVB}。其中 NVB、PVB 的中心都选择期望加速度的最大值和最小值,是控制器输出分别处在以上设定范围内。在等级划分时采用非对称非线性划分,靠近控制原点采用较密的划分,提高模糊系统的分辨率,使控制更为精细;远离原点的区域采用稀疏的划分,使系统变化更为平稳,同时提高响应速度^[4]。隶属度函数均选用三角形函数,量化因子 k_a 为 1。图 3 (a)和(b)分别为不限制减速度和限制加速度的输出隶属函数。

2.2 ACC 模糊决策逻辑设计

ACC 模糊决策逻辑是基于模糊控制规则设计的,基于驾驶经验及高速公路行车数据分析设计模糊控制规则。控制器规则集包含 49 条控制规则,如表 1 所示。

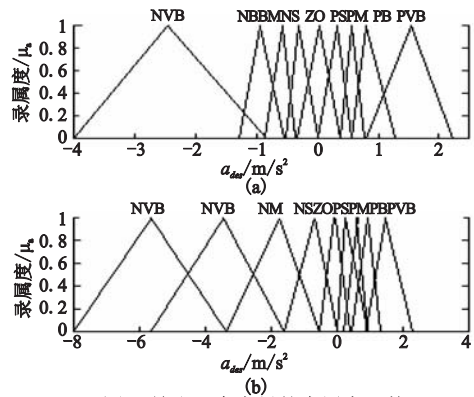


图3 输出语言变量的隶属度函数

表 1 模糊控制规则表

v_r	e_d						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	NS
NM	NVB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	Z	Z	Z	Z
ZO	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PS
PS	NS	Z	Z	Z	Z	PM	PB
PM	NS	Z	Z	PS	PM	PB	PVB
PB	NS	Z	Z	PS	PB	PVB	PVB

设计的控制规则统一了 ACC 经典控制理论中的距离控制、速度控制和前向防撞恒速控制等控制模式,并反映驾驶员的常见驾驶行为:

a) 当相对实距小于安全车距,目标车相对主车车速大于 0,驾驶员总是轻微制动或保持车速不变,而不是大强度制动。

b) 当相对实距大于安全车距,但目标车相对主车车速小于 0 且为 NB,驾驶员并不是急于加速保持安全车距离,而是轻微制动保证相对车速为 0 的控制目标。

c) 当相对实距大于安全车距,相对车速在“0+”附近,应该轻微或中等强度加速保证相对车速为 0 的控制目标,而不是猛加油门快速跟进。

d) 当相对实距远大于安全车距,相对车速小于 0 且为 NM 或 NS,主车先保持车速不变跟随前车,到车距偏差 PS 范围内再加以控制。

e) 在靠近相对车速为 0 及车距偏差为 0 的原点区域,存在一个控制的“死区”,即期望加速度输出都为 ZO。

f) 当相对实距和相对车速都很大时,如果主车车况正常,说明其车速可能偏低,需要加大油门跟进,否则中间可能不断有车进行并线,影响主车行车效率。当主车加速至设定的巡航车速时,应该停止加速,保持巡航车速行驶。

模糊控制算法基于 Mamdani 推理进行,控制规则形式为

$$\text{if } e_d = A_i \text{ AND } v_r = B_j \text{ then } a_{des} = C_{ij}$$

其中: A_i 为相对车距偏差的模糊语言变量; B_j 为相对车速的模糊语言变量; C_{ij} 为期望加速度的模糊语言变量。最后采用重心法对控制器输出进行解模糊,输出精确的期望加速度 a_{des}^* 。控制算法中所应用的模糊算子包括模糊 AND、模糊 OR、模糊蕴涵以及模糊聚类。其中模糊蕴涵设定为常用的 min,模糊 OR 采用 max 算子,聚类采用 max 算子,即合成运算采用 max-min 算子。

3 ACC 执行机构调节模式切换设计

ACC 控制目标对输出期望加速度的跟踪是通过调节节气

门开度或施加主动制动实现的,必须建立这两种调节模式的切换逻辑。经典理论为依据图 4 所示的发动机制动的最大减速度得到控制模式切换的参考条件,即 $a_{des} \geq a_{th} + 0.1$,节气门调节; $a_{des} \leq a_{th} - 0.1$,主动制动; $a_{th} - 0.1 < a_{des} < a_{th} + 0.1$,节气门全关,不进行调节。引入 0.1 m/s^2 偏置量的目的在于避免节气门控制和制动控制间的频繁转换^[5]。但是考虑道路存在一定坡度及风力较大,即空气阻力较大的情况下可能发生调节模式切换的误判。

针对该问题,引入新的 ACC 控制模式切换条件。当 ACC 系统开始控制汽车时,其最初的工作方式可设为节气门控制,仅当节气门完全关闭时若需要对主车实施进一步的减速控制,考虑切换到制动控制方式;而在制动控制方式下,当控制 ABS 常闭阀指令信号占空比增加到 100%,即完全减压条件下,当期望车速依然上升即 $a_{des} > 0$ 时,意味着应由制动干预调节切换至节气门控制方式。表 2 为 ACC 控制模式切换条件。

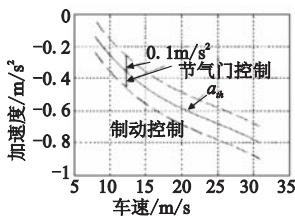


图4 ACC执行机构调节模式切换曲线

表2 控制模式切换条件	
切换条件	切换结果
节气门完全关闭, $\dot{v}_{des} < 0$, 且 $\dot{v}_{des} < 0$	节气门控制 → 制动控制
ABS常闭阀占空比增至100%, 且 $\dot{v}_{des} \geq 0$	制动控制 → 节气门控制

根据 ACC 控制模式切换条件所得到的切换结果,可以在下位控制器中采用适当的驱动方法对节气门或制动系统进行调节,以跟踪上位控制器输出的期望加速度,如模糊调节、PID 调节,以及两者的混合调节方法^[6]。

4 ACC 可变输出论域模糊控制算法

4.1 算法设计原因

限制加速度的 ACC 车速变化较为平缓,减速度小,但调节次数多、车速波动频繁,安全性在较危险的工况下得不到保证;不限制加速度的 ACC,车速变化剧烈,但调节迅速、调节次数少,在危险工况下能发挥汽车最大制动潜力。两种控制系统的超调都比较大,这是常规模糊控制系统用做上位控制器难以避免的。为了充分发挥模糊控制器整个输出论域的控制优点,回避其弱点,有必要将上文描述的两类模糊控制算法进行综合,设计出根据 ACC 实际控制需求的可变输出论域模糊控制算法。

4.2 算法基本原理

设模糊控制器输出变量为 $a \in U$, 模糊子集 $\tilde{C}_i \in \tilde{F}(U)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。一般地,论域 $U = [-b, b]$, b 为任意正数。模糊控制器 1 为 Fuzzy1, 构造输出变量模糊子集隶属函数为 $\mu_{i1}(a)$, 对于精确的输入变量 $v^*、d^*$, Fuzzy1 输出变量为

$$a_1 \in [f(\mu_{11}), f(\mu_{1n})] \subset [-b_1, b_1] = U_1 \quad (4)$$

模糊控制器 2 为 Fuzzy2, 输出变量模糊子集隶属函数为 $\mu_{i2}(a)$, Fuzzy2 输出变量为

$$a_2 \in [f(\mu_{21}), f(\mu_{2n})] \subset [-b_2, b_2] = U_2 \quad (5)$$

由此得 Fuzzym 输出变量为

$$a_m \in [f(\mu_{m1}), f(\mu_{mn})] \subset [-b_m, b_m] = U_m \quad (6)$$

$$f(\mu_{11}) > f(\mu_{21}) > \dots > f(\mu_{m1}), f(\mu_{1n}) < f(\mu_{2n}) < \dots < f(\mu_{mn})$$

$$b_1 < b_2 < \dots < b_m, b_m = b$$

其中: μ_{ij} 为各个控制器模糊子集隶属函数 ($i = 1, 2, \dots, n$ 为模

糊划分等级数; $j = 1, 2, \dots, m$ 为各模糊控制器编号); $f(\mu_{m1})$ 是与模糊子集隶属函数设置有关的各个控制器实际输出变量的极小值; $f(\mu_{mn})$ 是与模糊子集隶属函数设置有关的各个控制器实际输出变量的极大值; $U_j = [-b_j, b_j]$ 为各个控制器输出变量模糊集的论域; a_j 为 Fuzzyj 输出变量值。

设计可变论域模糊控制器 Fuzzy0, 对于精确的输入变量 $v^*、d^*$, 输出变量为

$$a^* = F(v^*, d^*) \quad (7)$$

为整合模糊控制器在各论域范围的控制优点:

$$a^* = \sum_{j=1}^m k_j a_j \quad (8)$$

其中: k_j 为各个控制器输出变量的权值, $k_1 + k_2 + \dots + k_m = 1$; 其余参数意义同前。

由于各个控制器 Fuzzyj 采用重心法解模糊, 有

$$a^* = \sum_j \frac{\int_{U_j} k_j a \mu_j da}{\int_{U_j} \mu_j da} \quad (9)$$

Fuzzy0 相当于一个二级模糊控制器, 针对不同的精确输入变量, 将所有控制器输出隶属函数的重心都加权求和, 所以其输出变量可能不在原控制器 Fuzzyj 特定的某个论域范围 $[-b_j, b_j]$ 内, 相当于改变了原始控制器输出变量模糊子集的论域输出。而整合后的控制器特性取决于各个原始控制器的控制特性以及权值的选取。将式(8)写为

$$a^* = K a \quad (10)$$

其中: $K = [k_1, k_2, \dots, k_m]$ 为权值向量; $a = [a_1, a_2, \dots, a_m]$ 定义为模糊控制器 Fuzzy0 的控制基。

4.3 算法描述

由于权值很难界定, 为了 ACC 实际应用的方便, 对式(8)的可变论域模糊控制算法进行修正。考察 Fuzzy0 的控制基 a , 若 a 上的任意元素都有 $a_j \in U_k$ 成立, 且对于 U_{k-1} , a 存在一个元素 $a_i \notin U_{k-1}$, 则控制权值

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = k, \\ 0 & j \neq k \end{cases} \quad (11)$$

其中: $j = 1 \sim m, k = 1 \sim m; U_k$ 为控制基对应各控制器输出变量论域。

该控制算法相当于根据实际工况兼顾了 ACC 的安全性与舒适性, 根据子控制器输出变量在论域中的分布情况输出一个典型值, 该值为本论域包含下一级论域中输出变量的最大值。针对期望加速度范围为 $[-2.5, 1.5]$ 及 $[-5.8, 1.5]$ 的模糊控制器, 应用可变输出论域模糊控制算法。当两控制器输出的期望加速度都在 $[-2.5, 1.5]$ 内时, 以舒适性为主要参考目标, 取限制减速度的控制器输出值; 若两控制器中存在超出 $[-2.5, 1.5]$ 的输出值, 取不限减速度即期望加速度范围为 $[-5.8, 1.5]$ 的控制器输出值。该控制算法中含有两个模糊子控制器, 但是将模糊控制器经调试后简化为一个二维查表模块, 实时性并不会受太大影响。

5 实验研究

实验工况设为 ACC 经常起作用的前车近距离低速并线工况, 在平直良好路面上, 主车以 100 km/h 初速巡航, 目标车以 85 km/h 车速匀速行驶, 主车 ACC 探测到目标车时, 初始相对车距为 30 m。实验中采用可变输出论域模糊控制器, 结果如图 5 所示。

确的粒子确定性漂移向量,粒子的动态分布更能趋于在目标真实状态区域附近,大大提高了粒子的利用效率,因此可以用较少的粒子点完成目标跟踪,同时减少了计算负担,这比嵌入卡尔曼滤波的耗时是微不足道的。

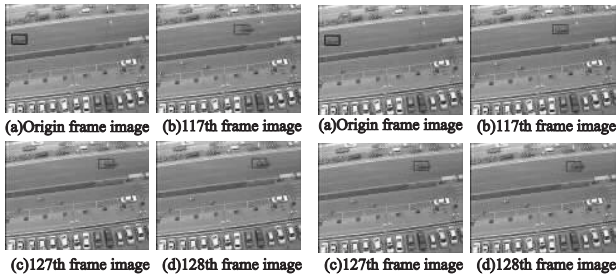


图5 颜色粒子滤波跟踪结果

图6 本文算法跟踪结果

4 结束语

本文在对传统的基于颜色的粒子滤波算法分析的基础上,提出了嵌入卡尔曼预测器的粒子滤波跟踪算法,对视频中感兴趣目标跟踪仿真,将仿真结果与经典基于颜色的粒子滤波算法进行比较。结果表明,在非线性强的条件下,本文通过嵌入卡尔曼预测器的粒子滤波跟踪算法明显优于传统的基于颜色粒子滤波算法,也提高了算法的实时性。本文较强的跟踪特性,为智能视频监控后续进行计算机高层次的分析提供了保障。但不能忽视粒子滤波固有的退化问题,而且随着粒子数目增加,系统时间复杂度呈现级数提高,还需要进一步研究。

参考文献:

[1] PEREC P, VERMAAK J, BLAKE A. Data fusion for visual tracking with particles[J]. Proceeding of the IEEE, 2004, 92(3):495-513.
 [2] DOUCET A, FREITAS N D, GORDON N. Sequential Monte Carlo in

practice[M]. New York:Springer, 2001:9-19.
 [3] ISARD M, BLAKE A. Visual tracking by stochastic propagation of conditional density[C]//Proc of the 4th European Conference on Computer Vision. Cambridge:[s. n.], 1996:343-356.
 [4] DOUCET A, GODSILL S, ANDRIEU C. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering[J]. Statistics and Computing, 2000,10(3):197-208.
 [5] GORDON N J, SALMOND D J, SMITH A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IEEE Proceedings Fin Radar and Signal Processing, 1993,140(2):107-113.
 [6] CHENG Chang, ANSARI R. Kernel particle for visual tracking[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(3):242-245.
 [7] NUMMIARO K, KOLLER-MEIER E, GOOL L van. An adaptive color-based particle filter[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(1):99-110.
 [8] 张笑微,师改梅,周建雄,等. 结合颜色和结构信息的粒子滤波跟踪算法[J]. 光电工程, 2008, 35(10):1-6.
 [9] 高建坡,韦志辉,孟迎军,等. 基于均值移动确定性漂移的改进 CONDENSATION 人脸跟踪[J]. 光电工程, 2009, 36(2):137-142.
 [10] YU Dan, WEI Wei, ZHANG Yuan-hui. Dynamic target tracking with Kalman filter as predictor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009,36(1):52-56.
 [11] BIRCHFIELD S T, RANGARAJAN S. Spatiograms versus histograms for region-based tracking[C]//Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC:IEEE Computer Society,2005:1158-1163.
 [12] COMANICIU D, RAMESH V, MEER P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ:IEEE Computer Society,2000:142-149.
 [13] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社,1999.

(上接第 467 页)

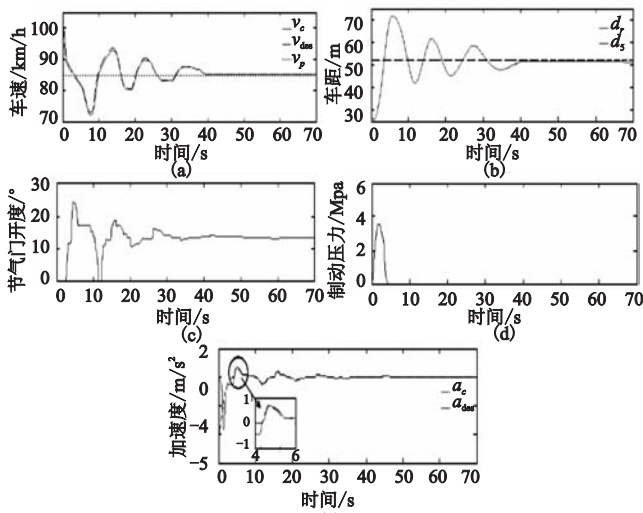


图5 ACC模糊控制器仿真结果

图5(a)~(e)分别为车速、车距、节气门开度、制动压力、车辆加速度变化曲线。(a)中 v_c 为主车车速, v_p 为目标车速, v_{des} 为期望车速;(b)中, d_r 为相对车距, d_s 为安全车距;(e)中, a_c 为主车实际加速度, a_{des} 为ACC控制器期望加速度。从仿真曲线可看出,可变输出论域模糊控制器刚开始控制时,减速度达到了 3.8 m/s^2 ,与前车相对距离最小时超过了 20 m ,保证了主车的安全性。之后的控制特性与限制加速度的模糊控制器

相同,加速度变化比较平缓,体现了ACC控制的舒适性。

6 结束语

仿真研究表明本文设计的汽车自适应巡航系统可输出论域模糊控制算法,可根据ACC当前工况期望加速度的大小范围调节模糊控制算法输出论域,充分发挥了模糊控制器在整个输出论域的控制优点,综合协调了ACC调节的舒适性与ACC控制安全性之间的关系。ACC典型工况仿真结果表明,该控制算法同时满足ACC乘坐舒适性和保持安全车距的要求。

参考文献:

[1] ZHOU J, PENG H. Range policy of adaptive cruise control for improved flow stability and string stability[C]//Proc of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control. 2004:595-600.
 [2] ALFRED H, WERNER H, REINER D, et al. Longitudinal autonomous vehicle control utilizing access to electronic throttle control, automatic transmission and brake[C]//Proc of SAE International Congress and Exposition. 1996:1405-1411.
 [3] HERMANN W, HERBERT O. Major design parameters of adaptive cruise control[C]//Proc of AVEC'98. 1998:517-524.
 [4] DRIANKOV D, HELLENDORN H. An Introduction to fuzzy control[M]. Berlin:Springer-Verlag, 1993.
 [5] 张景波,刘昭度,马岳峰,等. 信息融合技术在汽车安全行驶系统中的应用[J]. 系统仿真学报, 2003,15(9):1208-1210.
 [6] 吴利军. 汽车ABS/ASR/ACC集成化控制系统仿真研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.