

考虑旁车切入的车辆自适应巡航控制策略研究

秦少威, 周炳松, 谭重阳, 蒋韬靖

(柳州五菱新能源汽车有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要:为了兼顾安全性和舒适性,开展切入工况的自适应巡航控制优化研究。本文以车辆速度差最小化作为控制目标,利用反馈控制理论优化 ACC 策略,以保持平稳跟随前车的运动状态。优化后的 ACC 策略应用表明,在旁车切入下,主车可以保持设定的安全距离,且加速度变化保持在 10% 左右。

关键词:ACC 策略; 旁车切入; 安全性; 舒适性

中图分类号:U471.15

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)03-0015-04

Research on Adaptive Cruise Control Strategy Considering for a Vehicle Under a Side Vehicle Cutting in

QIN Shaowei, ZHOU Bingsong, TAN Chongyang, JIANG Taojing

(Liuzhou Wuling New Energy Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract:To give attention to safety and comfort, the authors carry out the research on adaptive cruise control optimization under cut-in conditions. They take the vehicle speed difference minimization as the control objective, and use feedback control theory to optimize the ACC strategy to maintain a motion state while smoothly following the preceding vehicle. The application of the optimized ACC strategy shows that the main vehicle can maintain the set safe distance and maintain an acceleration change of about 10%.

Key words:ACC strategy; side vehicle cutting in; security; comfort

以往的自适应巡航控制(ACC)系统大多利用同车道内前车行驶信息控制纵向速度,未考虑提前利用旁车道车辆的并线行驶信息进行预判并控制速度^[1],这会对安全性和舒适性有一定影响,需开展切入工况下的 ACC 策略研究,通过提高智能驾驶性能来改善驾乘体验^[2]。

学者们采用机器学习与训练的方法来优化车辆切入下的 ACC 策略^[3-4]。例如,文献[5]中使用多行为模型过滤器对切入行为进行分类,实时估计周围车辆的运动状态;文献[6]中根据切入的行车意图,采用动态规划求解最优控制,以实现 ACC 多目标优化。但以往的控制策略在旁车切入时会导致主车加速度过大,从而降低了驾乘舒适性。因此,需要综合考虑

舒适性和安全性,构建 ACC 系统的约束条件;根据切入车辆的状态动态调整主车的速度和加速度,构建 ACC 系统的控制策略。

1 旁车切入下 ACC 系统约束条件

在 ACC 策略中,约束条件通常是一些物理限制、操作限制或性能指标等,这些约束条件对系统的稳定性、可控性和安全性具有重要影响。本文为实现精准地跟踪各目标车辆,将前后车辆速度差的最小化作为主要控制目标,ACC 逻辑框图如图 1 所示。

综合考虑安全性、预判性和舒适性,制定相应的目标函数和约束条件,以实现智能驾驶技术的应用和推广。

收稿日期:2024-01-24。

第一作者:秦少威(1987—),男,工程师;主要从事车辆智能网联研究工作。E-mail:qinshaowei@wuling.com.cn。

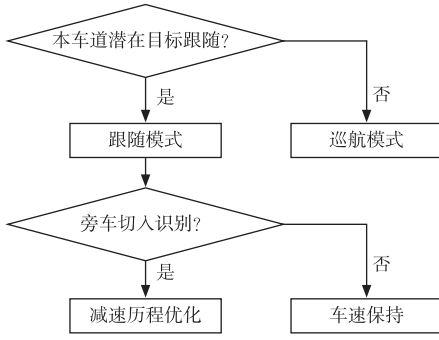


图 1 ACC 逻辑框图

1) 安全性。在旁车切入时,需保证两车间的实际车间距始终大于一个安全跟车间距,对两车实际距离施加相应的硬约束,同时速度需满足交通法规。

$$d_x = x_f - x_h \geq d_s \quad (1)$$

$$v_{\min} \leq v_h \leq v_{\max} \quad (2)$$

式中: d_x 为两车纵向实际车间距; x_f 为旁车行驶距离; x_h 为主车行驶距离; d_s 为所限定的最小安全车间距; $v_{\min}$ 为主车最小速度; v_h 为主车的当前车速; $v_{\max}$ 为主车最大速度。

2) 预判性。本文根据文献[7]的条件,判断旁车切入本车道的依据为:与本车横向距离小于车道宽度的 1/2。

$$d_y \leq L/2 \quad (3)$$

式中: d_y 为两车横向安全冗余距离; L 为车道宽度,一般为 3.5~3.75 m。

3) 舒适性。常采用加速度的变化率来衡量行驶的舒适性,汽车在行驶中加速度变化剧烈,会引起驾驶员和乘客的不适。如旁车切入过程中,主车未提前判定,导致旁车切入到主车车道时,两车车距过小,主车为保持车距而急减速。因此应尽量避免汽车在行驶过程中加速度剧烈变化,即:

$$j_{\min} \leq j \leq j_{\max} \quad (4)$$

式中: j 为主车的加速度变化率; $j_{\min}$ 为最小加速度变化率; $j_{\max}$ 为最大加速度变化率。

将横向间距误差、相对速度和加速度变化率作为考虑舒适性和安全性目标函数的参数变量进行优化,得到方程式:

$$y(k) = Cx(k) - Z \quad (5)$$

式中: $y(k)$ 为目标函数; $x(k)$ 为横向间距误差、相对速度和加速度变化率构成的函数; C 为系数矩阵; Z

为距离向量。

本文 ACC 模型在满足安全性的基础上,考虑驾乘的预判性和舒适性,不同的指标间相互联系,相互制约,需要综合权衡和优化。

2 旁车切入下 ACC 系统的控制策略

为便于建立 ACC 预测模型并能够准确掌握系统当前动态行为,本文以同车道两车纵向相对速度、主车纵向速度、主车纵向加速度和两车纵向相对车距构建预测模型的状态向量。其中两车纵向相对速度 Δv 为前后两车速度之差:

$$\Delta v = v_f - v_h \quad (6)$$

由于传统的定车头时距无法处理前车动态的运动状态变化,难以在前车速度波动的工况下保持本车对其稳定的跟踪。因此,采用可变车头时距控制两车距离,而两车安全车距受当前主车车速影响:

$$d_s = S_0 + d_y(v_h) \quad (7)$$

式中: S_0 为临界安全距离,可取一个车长; $d_y(v_h)$ 为包含最小安全距离与可变车头的函数^[8]。

将主车和目标车辆的纵向相对距离与安全车间距的差值作为两车间距误差 Δd :

$$\Delta d = x_f - x_h - d_s \quad (8)$$

当描述期望加速度和实际加速度之间关系时,可添加一阶动态响应模型^[9]:

$$a_h = \frac{K}{T_j s + 1} a_{\text{des}} \quad (9)$$

式中: a_h 为实际加速度; a_{des} 为期望加速度; K 为一阶惯性环节的开环增益; T_j 为时间常数; s 为采样的时间间隔。

通过该动态响应模型,可实时调整主车的加速度和加速度变化率,以满足行车安全和舒适性要求。

根据前后两车的纵向动力学关系,结合上面式子进行离散化,可得变量之间的关系如下:

$$\begin{cases} \Delta v(k+1) = \Delta v(k) + a_f(k)T - a_h(k)T \\ v_h(k+1) = v_h(k) + a_h(k)T \\ a_h(k+1) = (1 - T/T_j)a_h(k) + (T/T_j)a_{\text{des}}(k) \\ d(k+1) = d(k) + \Delta v(k)T + a_f(k)T^2/2 - a_h(k)T^2 \\ j(k+1) = [a_{\text{des}}(k) - a_e(k)]/T_j \end{cases} \quad (10)$$

式中: a_f 为前车加速度; a_e 为加速度差值; d 为前后两车纵向相对距离; T 为采样周期。

选取两车纵向相对速度 Δv , 主车纵向速度 v_h , 主车纵向加速度 a_h 和两车间距误差 Δd 构建式(5)的函数:

$$x(k) = [\Delta d(k), \Delta v(k), v_h(k), a_h(k)]^T \quad (11)$$

式中: $x(k)$ 为 k 时刻的状态变量。

将主车的期望加速度作为 ACC 系统的控制变量 $u(k)$, 将前车加速度看作系统扰动变量 $w(k)$, 即:

$$u(k) = a_{des}(k); w(k) = a_f(k) \quad (12)$$

由此可写出其离散状态空间表达式:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gw(k) \quad (13)$$

式中: $x(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的状态变量, 是一个列向量; A, B, G 分别为位置变量、控制变量和扰动变量上的系数。

由上式可知, 本文构建的 ACC 系统动力学模型采用反馈控制, 根据前车的运动状态动态调整主车的速度和加速度, 以保持安全车间距并平稳跟随前车的运动状态。

3 实例分析

旁车切入场景设计: 在某仿真平台场景中并排添加 2 辆车, 分别为主车、旁车 (即切入后的目标车, 如图 2 所示); $t=0$ s 时, 旁车先行, 从静止加速至 20 km/h; $t=5$ s 时, 主车以设定的 40 km/h 自适应巡航速度从静止开始加速行驶; $t=15$ s 时, 旁车切入至主车车道, 主车识别到切入的旁车后立即减速至 20 km/h, 并与旁车保持车距; $t=30$ s 时, 旁车以 -1 m/s² 速度进行减速, 直至刹停, 主车随之减速, 直至刹停。

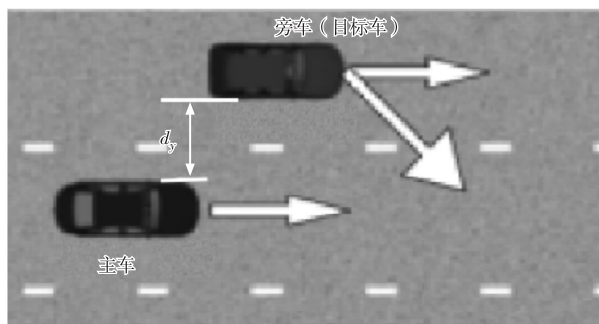


图2 本文切入场景实例

根据式(1)~(5)可知的约束条件参数见表1。

表1 约束条件参数

参数名称	参数符号	参数值
最大车间距误差/m	$\Delta d_{\max}$	25
最大车速/(km·h ⁻¹)	$v_{\max}$	120
最大加速度/(m·s ⁻²)	$a_{\max}$	3.5
最小加速度/(m·s ⁻²)	$a_{\min}$	-3.5
最大期望加速度/(m·s ⁻²)	$a_{des\max}$	2
最小期望加速度/(m·s ⁻²)	$a_{des\min}$	-2
最大加速度变化率/(m·s ⁻³)	$j_{\max}$	2.5
最小加速度变化率/(m·s ⁻³)	$j_{\min}$	-2.5

根据式(6)~(10)可得到如图3所示的主车和目标车速度变化曲线。

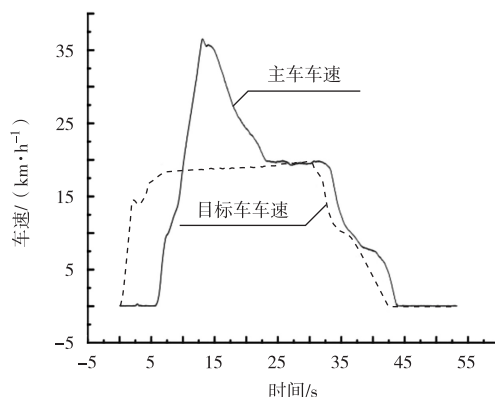


图3 主车和目标车速度对比曲线

根据式(8)、(11)~(13)可得到如图4所示的双车纵向距离变化曲线。

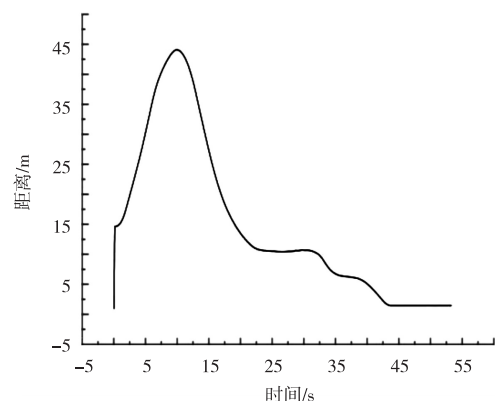


图4 双车纵向距离变化曲线

根据式(9)、(11)~(13)可得到如图5所示的主车加速度变化曲线。

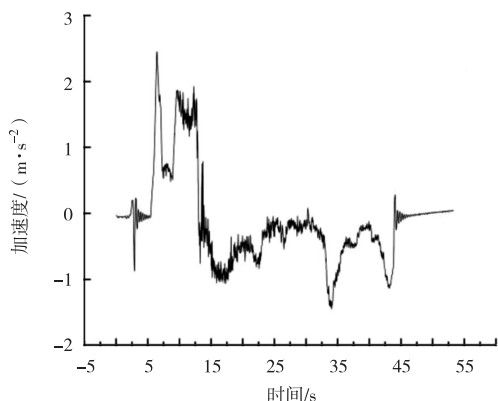


图5 主车加速度变化曲线

由图3~图5可知,主车在加速到设定车速的过程中,加速度变化峰值在 2.5 m/s^2 ,在旁车切入并被识别为潜在碰撞目标车后减速。考虑到舒适性的约束要求,旁车切入后主车的加速度变化峰值在 -1.5 m/s^2 以内;考虑到安全性的要求,稳定跟车车间距在 $1.5 \sim 2.2 \text{ m}$ 之间,均值为 1.8 m ,在旁车切入后两车一直保持式(7)的安全距离。直至刹停也未发生碰撞。

上述试验的部分实测数据见表2,满足评价指标要求,表明该ACC策略兼顾了安全性和舒适性。

表2 ACC系统评价指标与实测值

评价指标	评价标准	实测值
两车车速误差/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	<1	0.3
最大加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	<3.5	2.5
稳定跟车车间距/m	$[1.5, 2.2]$	1.8

4 结束语

1) 在设定ACC策略的限制条件时,本文综合考虑了安全性、预判性和舒适性。不同的指标间相互联系,相互制约,需要综合权衡和优化。

2) 本文构建的ACC系统动力学模型采用反馈控制,根据主车与目标车的运动状态动态调整主车的速度和加速度,以保持安全车间距并平稳跟随前车的运动状态。

3) 根据ACC加速度的变化幅值,本文的ACC策略不仅可保持在设定的安全距离,而且加速度和减速度变化都保持在10%内,兼顾了安全性和舒适性,达到了预期效果。

参考文献:

- [1] ZHU Hao, YUEN K V, MIHAYLOVA L, et al. Overview of environment perception for intelligent vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(10): 2584–2601.
- [2] LI Jie, LIU Yonggang, FOTOUHI A, et al. Cooperative ecological adaptive cruise control for plug-in hybrid electric vehicle based on approximate dynamic programming [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 3132–3145.
- [3] GRAF R, DEUSCH H, FRITZSCHE M, et al. A learning concept for behavior prediction in traffic situations [C]. 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2013: 672–677.
- [4] 凌滨, 宋梦实. 汽车自适应巡航系统车距控制策略研究 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(11): 143–148.
- [5] JO Kichun, LEE Minchul, KIM Junsoo, et al. Tracking and behavior reasoning of moving vehicles based on roadway geometry constraints [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(2): 460–476.
- [6] TSAI C C, HSIRH S M, CHEN C T. Fuzzy longitudinal controller design and experimentation for adaptive cruise control and stop & go [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010, 59(2): 167–189.
- [7] KIM S G, TOMIZUKA M, CHENG K H. Smooth motion control of the adaptive cruise control system by a virtual lead vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(1): 77–85.
- [8] YANAKIEV D, KANELAKOPOULOS I. Nonlinear spacing policies for automated heavy-chlty vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1365–1377.
- [9] 卫辛. 小型电动汽车自适应巡航控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2022.