

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.053

考虑城市交通环境的多模式自适应巡航控制策略

邓高攀,程前

(中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401122)

摘要:为了适应城市交通环境,提出多模式自适应巡航控制策略。在上层控制器中,设计恒速巡航、稳态跟随、接近/变道、强加速、强减速和避免碰撞 6 种模式策略;下层控制器采用 PID 控制结合查找表方法,设计油门控制器与制动控制器之间的过渡区。仿真结果表明:上层控制器能够在复杂工况下选择合适的行车模式,下层控制器能够满足下坡/上坡加速度控制的预期要求,符合车辆驱动系统特性,可以应用于实车驾驶辅助系统,提高车辆的行驶安全性。

关键词:高级驾驶辅助系统;自适应巡航控制;多模式设计;城市交通

中图分类号:U461.91 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0276-05

Multi-mode Adaptive Cruise Control Strategy Considering Urban Traffic Environment

DENG Gaopan, CHENG Qian

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: A multi-mode adaptive cruise control strategy is proposed to adapt to urban traffic environment. In the upper controller, six mode strategies are designed, which includes constant speed cruising, steady state following, approach/lane change, strong acceleration, strong deceleration and collision avoidance. The transition zone between throttle controller and brake controller is designed by PID control and lookup table method in the lower controller. The simulation results show that the upper controller can select the appropriate driving mode under complex working conditions, while the lower controller can meet the expected requirements of downhill/uphill acceleration control, which is in line with the characteristics of the vehicle drive system and can be applied to the real vehicle driving assistance system for the improvement of vehicle driving safety.

Keywords: advanced driver assistance systems; adaptive cruise control; multi-modal design; urban transportation

0 引言

随着环境感知和智能控制技术的发展,自适应巡航控制(ACC)需要更多的功能来满足车辆行驶多样化的需求^[1-2]。首先,ACC 不仅要适应稳态行驶工况,还要适应变道、弯道^[3]等复杂行驶环境。其次,ACC 应与熟练驾驶员的大部分行车特性^[4]相兼容。此外,现有的 ACC 只考虑一个主目标,没有考虑旁车道其他可能的车辆目标,因此在瞬态条件下 ACC 不能及时响应。

目前已有许多关于 ACC 策略的研究^[5-7]。但这些研究缺乏针对城市交通工况的独特设计。由于城市中频繁出现前车切入或切出的情况,在这种情况下,驾驶员无法长时间稳定地跟随前车。此外,城市中有大量的坡道和城市高架桥,增加了前车跟随的难度。对于一个有经验的驾驶员来说,在这些复杂的场景下仍可以保障车辆的行驶

安全性和舒适性。

本文提出了城市交通中安全平稳行驶的 ACC 多模式策略。设计了 ACC 上层控制器对主车的控制逻辑,在低层控制器中定义了主车跟随前车所需的速度,定义了切入/切出以及停车和行驶操作的相关场景。针对这些场景,对多模式下的 ACC 策略仿真进行了测试评价,并与传统的 ACC 策略进行了对比分析,其结果表明多模式的 ACC 策略具有更好的灵活性,其综合性能优于传统 ACC 控制方法。

1 ACC 控制策略概述

针对复杂的城市交通环境,将控制器控制策略分为上层控制器和下层控制器。上层控制器由模式切换层和 6 个模式组成,用于计算主车所需加速度。在模式切换层,通过两车相距时差(time headway, THW)和碰撞时间(time to collision,

第一作者简介:邓高攀(1992—),男,重庆人,工程师,本科,研究方向为汽车主动安全、汽车整车性能测试、汽车整车主观评价等,yizeword@163.com。

TTC)^[8],根据切换规则确定适合城市交通环境的预期模式。提出了包括恒速巡航、稳跟、接近、变道、强加速、强减速和避撞等多种模式。根据不同的驱动特性,各模式响应得到不同的纵向加速度和加加速度。然后,下层控制器通过油门、制动或怠速控制跟随上层控制器的所需加速度。最后,将主车的实际加速度、速度、油门开度、制动压力等状态反馈给下层控制器。同时,上层控制器对车与车之间的相对距离和相对速度也有影响。ACC策略的框架如图1所示。

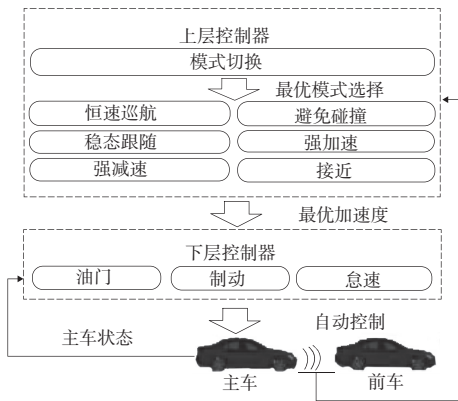


图1 多模式ACC策略架构

2 上层控制器

2.1 恒速巡航稳态跟随模式

ACC控制系统只有恒速巡航和稳态跟踪两种模式,这两种模式在稳态条件下是有效的。区别在于前车是否在有效的雷达距离内,是否比驾驶员的预期速度慢。如果主车速度大于巡航速度或相对距离大于100 m,则选择恒速巡航,控制结构如图2所示。

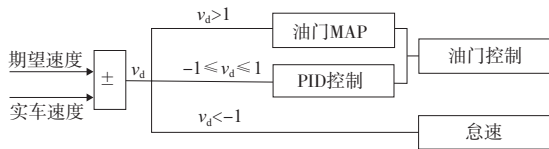


图2 恒速巡航控制结构

图2中 v_d 为期望速度与实际速度之差,如果 v_d 小于 -1 m/s,匀速巡航具有一定的舒适性,加速度范围为 -2 m/s² ~ 1 m/s²。

若进入稳态跟随模式,控制模型表示为:

$$a_d = k_1 \times v_h \times (d_{des} - d_t) + k_2 \times v_h \times v_r \quad (1)$$

$$d_{des} = 1.4 \times v_p + 2 \quad (2)$$

式中: a_d 为主车期望加速度; k_1 、 k_2 分别为距离增

益系数和速度增益系数,分别受主车速度 v_h 的影响; d_{des} 为期望相对距离; d_t 为实际相对距离; v_r 为相对速度; v_p 为前车速度。驾驶员期望两车相距时差设为 1.4 s。

2.2 接近和变道模式

ACC作为一种高级驾驶辅助系统,控制系统在运行过程中如何减少驾驶员的干预是非常重要的。传统的ACC只在接近前车时减速。但相关文献显示^[9-13],70%的驾驶员会选择变道以获得更大的速度优势。因此,有必要在接近前车情况下预测变道意图的可能性。

如果驾驶员更倾向于变道,ACC系统不必让主车立即减速。如果驾驶员倾向于放弃变道意图,则ACC系统进入传统的接近和稳定跟随。变道可能性有两个指标,一个是前车与驾驶员预期速度之间的速度差。另一个是根据旁车道空间计算得出的安全行车线路。变道意图预测如图3所示。

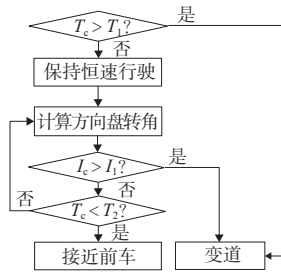


图3 变道预测流程图

图3中 T_1 为变道初始时间, T_2 为变道终止时间, I_1 为变道概率阈值,表示有足够的变道优势。 T_c 是充分利用车辆纵向信息的时间指标。如果 T_c 大于 T_2 ,说明驾驶员已经放弃变道,ACC进入接近前车模式。因此,与传统ACC相比,增加了 T_1 到 T_2 的周期,以避免对驾驶员正常变道造成不必要的干扰。如果没有变道优势,主车会开始接近前车。接近方式可表示为

$$a_d = \frac{k_3 \times v_r^2}{2(d_t - d_{des})} \quad (3)$$

加速度接近模式的范围为 -2 m/s² ~ 0 m/s², 加加速度接近模式的范围为 -5 m/s³ ~ 5 m/s³。

2.3 强加减速模式

当前车超车或快速加速,且主车速度低于驾驶员预期速度时,可能发生强加速模式。考虑到燃油经济性和交通效率,主车加速度限制在 1 m/s² ~ 3 m/s²。在强加速模式下,相对速度误差比相对距离误差对驾驶员注意力的影响更大。

因此,所期望的加速度如式(4)所示。

$$a_d = 0.3 \times v_r + 0.03 \times (d_t - d_{des}) \quad (4)$$

同样,在强减速模式下,前车突然切入或突然减速的情况是主要考虑因素。考虑碰撞安全,减速范围为 $-2 \text{ m/s}^2 \sim -4 \text{ m/s}^2$ 。同时,为保持制动过程中近似均匀减速,强减速模型可表示为

$$a_d = \frac{v_r^2 \times k_4}{2(d_t - d_{des})} \quad (5)$$

2.4 避免碰撞模式

如果相对距离小于最小安全距离(100 m),ACC 车辆将进入避免碰撞模式。一旦该模式被激活,主车辆开始以最大减速制动,直到完全停止。避碰模型的最小安全距离可表示为

$$d_{\min} = t_1 \times v_r + \frac{v_h^2 - v_p^2}{2a_{\max}} \quad (6)$$

式中: $d_{\min}$ 为最小安全距离; $a_{\max}$ 为最大减速; t_1 为制动系统延迟时间。

2.5 模式切换

Stateflow 的多模式切换策略如图 4 所示。为了选择最优模式,在 ACC 策略中增加了模式切换层。在 6 种模式中,一旦进入最小安全距离范围,避免碰撞模式优先级最高,其他模式根据切换规则进行设计,如图 5 所示。采用 THW 和 TTC 作为量化指标。前者表示稳定跟随的收敛趋势,后者表示紧急避让的影响。THW 和 TTC 的定义分别如下所示。

$$T_{HW} = \frac{d_t}{v_h} \quad (7)$$

$$T_{TC} = \frac{v_r}{d_t} \quad (8)$$

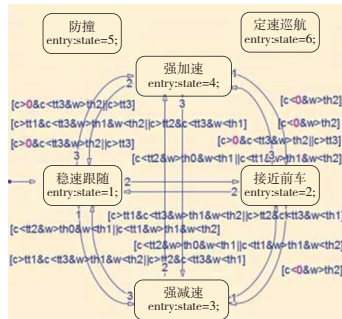


图 4 多模式切换策略

在图 5 中, t_{h1} 和 t_{h2} 分别对应于驾驶员期望时间间隔(1.4 s)的 90% 和 160%, t_{t1} 、 t_{t2} 和 t_{t3} 与根据驾驶员统计特征设置的 TTC 相关^[14],本文中设置其参数分别为 1.5 s、1.0 s、1.9 s。此外,还建立了 1

个过渡区,以降低模式切换的频率。只有连续 3 次选择新模式的切换位,才能实现真正的切换。

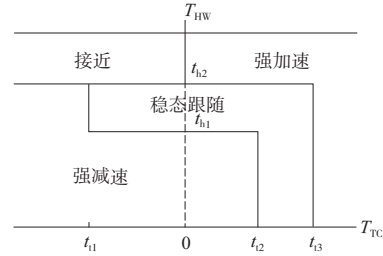


图 5 切换规则

3 下层控制器

下层控制器的目标是跟踪来自上层控制器的所需加速度。首先,提出了由驱动模式、制动模式和怠速模式组成的合理切换策略;其次,采用反向查找表来计算所需的油门开度或制动压力;最后,执行机构按照指令执行,确保有效跟踪期望的加速度。下层控制器结构如图 6 所示。

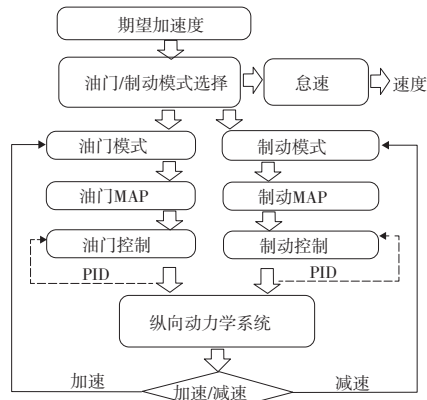


图 6 下层控制器结构

为了减少油门和制动之间的频繁切换,如图 7 所示,设计了一个怠速过渡区。基线为车辆怠速加速度,油门/制动区设置为 h_1 和 h_2 阈值。

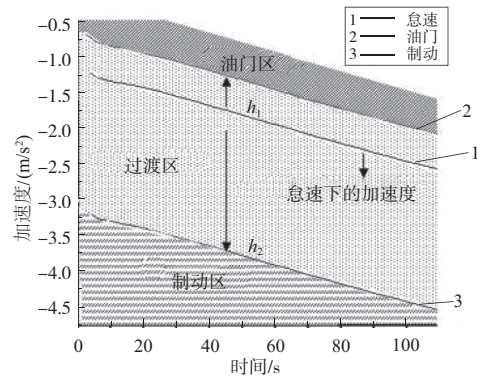


图 7 模型选择

如果进入油门/制动区域,执行器的初值由油门/制动 MAP 实现。油门/制动 MAP 的输入为车速和期望加速。此外,针对城市环境中复杂的路况,加入 PID 控制,以降低干扰和模型失配的影响。

4 仿真结果

在本节中,实现了 CarSim 和 Simulink 仿真,设计了包括前车切入/切出、前车停车/行驶的场景。基于这些场景进行了相关的仿真测试,其结果如图 8-图 10 所示。

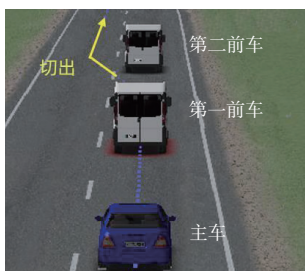


图 8 前车切出场景

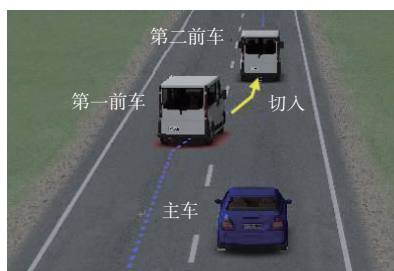


图 9 前车切入场景



图 10 停车和起步场景

4.1 场景 1: 前车切入/切出

如图 8 和图 9 所示,第一前车在 13 s 时切出,在 26 s 时切入。为了适应切入/切出场景,采用了本文提出的多模式 ACC 策略,如图 11 所示,在 ACC 车辆的模式中,1 为平稳跟随,2 为接近,3 为强减速,4 为强加速,5 为避碰,6 为恒速巡航。

场景 1 开始时主车与第一前车很接近,此时,主车立即以强减速模式减速,直至进入稳态跟随。到 13 s 时,由于跟随目标发生变化,主车开始向第二前车靠近。随着第二前车加速,主车转到强加速模式,然后稳定跟随。在 26 s 时,第一前车切入,这促使主车在稳定跟随前进行强减速。到

46 s 时,主车经过强加速后速度超过驾驶员预期速度,然后主车处于恒速巡航模式。

主车加速度如图 12 所示。结果表明,多模式控制器在强加减速等瞬态模式下能够快速响应切入/切出场景,且考虑到驱动特性,各模式对应的加速度均能实现。

速度跟随和距离跟随的结果分别如图 13 和图 14 所示。到 13 s 和 26 s 时,由于跟随对象不同,所期望的和实际的相对距离发生了变化,此时 ACC 车辆必须适应克服速度误差和距离误差。由图 13—图 14 可知,本文所设计的多模式 ACC 策略无论在稳态还是瞬态,都有较好的跟随性能。

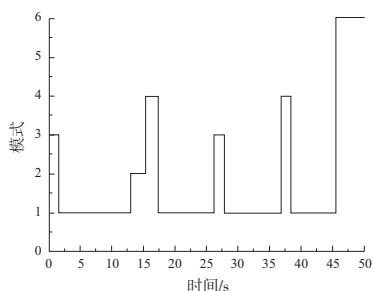


图 11 模式切换结果

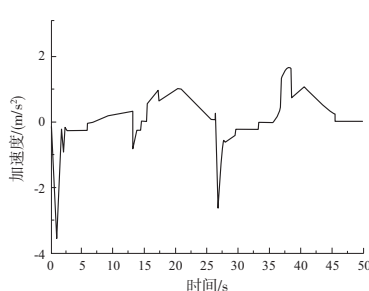


图 12 主车加速结果

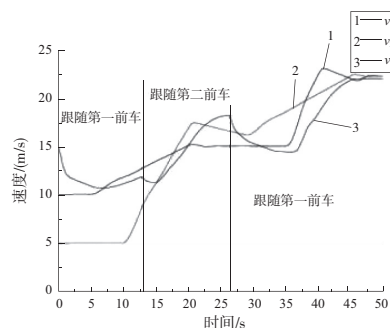


图 13 相对速度变化情况

4.2 场景 2: 前车停车和行驶

在场景 2 中,设置一条下坡道路,道路附着系数为 0.85。初始相对距离为 21 m,两车初始速度为 14 m/s。速度跟踪的结果如图 15 所示。0 s ~ 25 s,前车与主车保持 14 m/s 的初始速度。到 25 s 时,前车开始急剧减速,主车进入避免碰撞模式。从 28 s~46 s,两辆车都静止不动。在第 46 s,主车

开始加速跟随前车。从 52 s 到 60 s,两辆车的速度都保持在 14 m/s。

主车加速相应的仿真结果如图 16 所示。在 0 s ~ 25 s 期间,主车稳定匀速跟随前车,加速度为 0。从 25 s~28 s,主车以接近 6 m/s^2 的加速度平稳减速。从 28 s~46 s,由于主车静止不动,加速度再次变为 0。从 46 s~52 s,主车开始以接近

2 m/s^2 的加速度加速。最后,由于处于稳定跟随状态,在 52 s 时主车加速度归 0。仿真结果表明,

即使在下坡时,ACC 车辆也具有良好的跟踪性能。

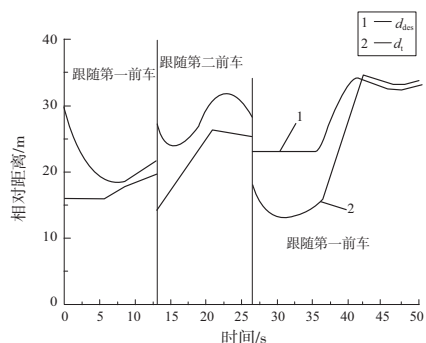


图 14 相对距离变化情况

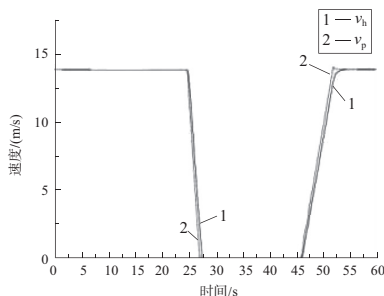


图 15 速度跟踪结果

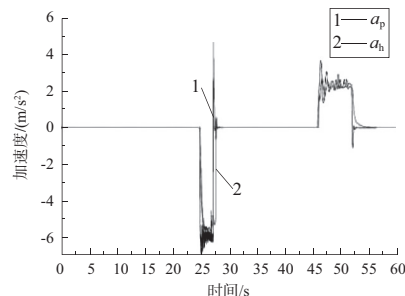


图 16 加速度跟踪结果

5 结语

本文提出了一种考虑城市交通环境的多模式 ACC 策略。首先,上层控制器设计了 6 种模式,通过模式切换,根据当前驾驶情况输出最优加速度。其次,设计了下层控制器用来跟踪所需的加速度。仿真结果表明,该模式切换策略较为合理,符合驱动系统的动力特性。最后,下层控制器可以在斜坡路况下跟踪车辆加速度。因此,该方法能够满足城市交通环境下车辆的不同行驶需求,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 孙友鼎. 弯道工况下自适应巡航系统多目标控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [2] 李亚勇,蔡英凤,陈龙,等. 考虑前后方车辆行驶状态的 ACC 系统控制方法[J]. 汽车工程,2019,41(8): 865-871.
- [3] 岳川元. 智能车辆全速 ACC 纵向 MPC 控制方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- [4] 朱茂琳. 具有换道辅助的 ACC 多模式控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
- [5] 李克强. 车辆多目标自适应巡航控制系统(ACC)动力学与控制方法研究[J]. 机械工程学报,2014,50(16):192.
- [6] 党睿娜. 具有换道辅助功能的车辆自适应巡航控制[D]. 北京:清华大学,2013.
- [7] 张德兆. 基于弯道行驶的车辆自适应巡航控制[D].

北京:清华大学,2011.

- [8] 李家文. 面向 ACC 的车辆定速巡航控制系统的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2007.
- [9] 叶小平. 基于循环工况的多模式控制策略开发[D]. 长春:吉林大学,2006.
- [10] LI S E, GUO Q Q, XIN L, et al. Fuel-saving servo-loop control for an adaptive cruise control system of road vehicles with step - gear transmission [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 (3): 2033-2043.
- [11] 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.
- [12] ZHAO R C, WONG P K, XIE Z C, et al. Real-time weighted multi-objective model predictive controller for adaptive cruise control systems [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18 (2): 279-292.
- [13] GAO Z H, WANG J, HU H Y, et al. Multi-argument control mode switching strategy for adaptive cruise control system [J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 581-589.
- [14] 姜文龙,周金应,褚观耀,等. 汽车紧急制动行人检测系统的设计与测试[J]. 机械制造与自动化,2021,50(3):184-189.

收稿日期:2023-01-16