

文章编号: 2095-2163(2023)04-0163-05

中图分类号: U463.6

文献标志码: A

基于模型预测控制的无人驾驶车辆纵向跟车控制研究

王 峥, 李欣格, 张天慈

(南京林业大学 汽车与交通工程学院, 南京 210037)

摘要: 为提升自适应巡航系统(adaptive cruise control, ACC)在纵向跟车工况下的安全性及乘车舒适性,基于模型预测控制(model predictive control, MPC)设计了面向无人驾驶车辆的跟车控制器,并在 Matlab/Carsim 联合仿真平台中搭建仿真模型,对该控制器在纵向跟车工况下的有效性进行验证,仿真结果表明:基于 MPC 的控制器可以使车辆在纵向跟车工况下实现稳定速度跟随并保持安全车距,同时车辆的实际加速度与期望加速度一致,能够保持在舒适范围内。

关键词: 无人驾驶车辆; 自适应巡航系统; 模型预测控制; 纵向跟车

Research on longitudinal car-following control of unmanned vehicle based on model predictive control

WANG Zheng, LI Xinge, ZHANG Tianci

(College of Automotive and Transportation Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

【Abstract】 In order to improve the safety and ride comfort of adaptive cruise control (ACC) in longitudinal car-following conditions, a following controller for unmanned vehicles is designed based on model predictive control (MPC). A simulation model is built on the Matlab/Carsim co-simulation platform to verify the effectiveness of the controller in longitudinal car-following conditions. The simulation results show that: The controller based on MPC can make the vehicle achieve stable speed following and maintain safe vehicle distance in longitudinal car-following condition, and the actual acceleration of the vehicle is consistent with the expected acceleration, which can keep within the comfortable range.

【Key words】 unmanned vehicles; adaptive cruise system; model predictive control; longitudinal car-following

0 引言

随着汽车制造技术的不断发展,国内汽车数量逐年增多,但却要指出的是,各类交通事故等问题也日显突出。数据显示,2019年国内道路交通事故共造成直接财产损失约9.1亿元,导致约6.7万人死亡,27.5万人受伤^[1]。近年来,无人驾驶车辆走入大众视野,其自动驾驶功能可减少因人为导致的交通事故的发生,为解决交通安全问题开辟了新方向。作为无人驾驶领域的重要组成部分,自适应巡航控制系统(adaptive cruise control, ACC)广泛应用于现代智能车辆中,其定速巡航、环境感知、自适应变速行驶等功能被人们所熟知。ACC不仅可以帮助驾驶员减轻驾驶压力,还在提高驾驶行为容错率和安全性方面有着重要意义^[2]。在无人驾驶车辆的实际道路行驶中,自动巡航是智能驾驶的基础功能,因此提高自动巡航功能的稳定性是无人驾驶技术的关键环节^[3]。针对上述问题,本文搭建基于模型预测控制的无人驾驶车辆自适应巡航控制器,并模拟无人驾驶车辆纵向跟车行驶工况,从乘车人的安全性、舒适性方面对控制器作用进行验证。

1 纵向跟车行驶 ACC 原理

无人驾驶车辆纵向跟车控制器由上层(决策层)控制器和下层(执行层)控制器组成^[4]。当纵向跟车 ACC 运行时,上层控制器根据对采样时刻输入的期望速度及设定的控制条件进行分析计算,将计算后得出的期望加速度、期望距离输入到下层控制器,下层控制器通过控制节气门开度或制动力大小进而控制车辆速度变化。而车辆的实际车速、与前车的实际距离又会通过传感器在下次采样时刻反馈到控制器中,控制器根据控制策略做出相应加减速调整,从而形成完整的反馈控制系统^[5]。图1为纵向跟车行驶 ACC 原理示意图。

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB580013);南京林业大学2021年大学生创新训练计划项目(2021NFUSPITP0451)。

作者简介: 王 峥(2001-),男,本科生,主要研究方向:自动驾驶、智能交通与新航行系统;李欣格(2001-),女,本科生,主要研究方向:汽车运用工程;张天慈(1989-),男,博士,讲师,主要研究方向:自动驾驶、智能交通与新航行系统。

通讯作者: 张天慈 Email: tczhang@njfu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-07

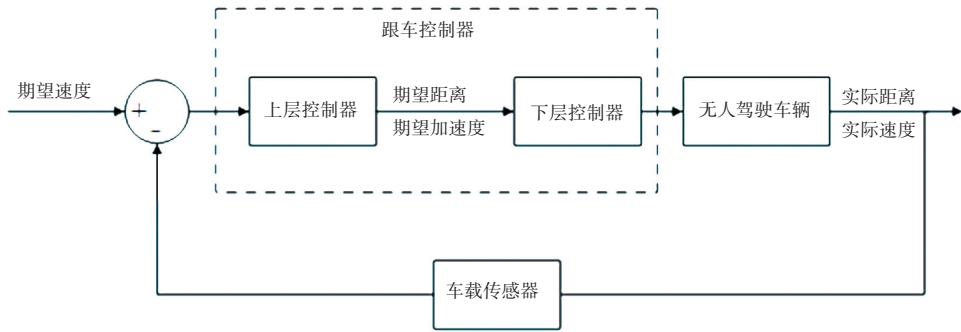


图1 纵向跟车行驶 ACC 原理

Fig. 1 Longitudinal car-following ACC principle

2 纵向跟车目标分析

在无人驾驶车辆跟车行驶过程中,行车安全需要首先考虑,确保两车距离始终保持在安全车距内;其次,行车过程中过大的加速度会使乘车舒适性降低,故在确保行车安全的前提下,无人驾驶纵向跟车ACC系统应兼顾考虑乘车舒适性,增加舒适性指标,以实现安全、舒适的跟车功能。

2.1 跟车安全性分析

在行车安全方面,行车过程中的最小安全距离由两车距离和车辆长度构成^[5-6],行车过程中,安全车距条件为:

$$d \geq d_0 \quad (1)$$

其中, d 表示本车与前车实际距离, d_0 表示最小安全距离。同时,要保持安全条件成立,车辆还需具有良好的速度追踪功能,即车辆行驶速度 v 与前车速度 v_f 的差值趋近于0,可表示为:

$$\Delta v = v - v_f \quad (2)$$

当式(2)中 $\Delta v \rightarrow 0$ 时,车辆具有较好的速度跟踪效果,此时能使车辆保持对前车的速度追踪,进而使车辆在行驶过程中持续满足式(1)所述的行车安全条件。

2.2 跟车舒适性分析

乘车舒适度可从车辆加速度变化来衡量,在车辆变速过程中,过大的加速度会使乘车舒适度下降,故加速度变化应约束在一个合理的范围内^[7],即:

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \quad (3)$$

其中, a_{\max} 、 a_{\min} 分别表示行车过程中的最大加速度和最小加速度。本文定义行车加速度的舒适范围为 $[-3, +3] \text{ m/s}^2$ 。

3 无人驾驶车辆纵向行驶运动学分析

无人驾驶车辆纵向行驶过程可简化为一非线性

三阶模型^[8],微分方程为:

$$\dot{s} = v \quad (4)$$

$$\dot{v} = a \quad (5)$$

$$\dot{a} = f(v, a) + g(v) \cdot \eta \quad (6)$$

其中, s 为车辆从参考位置测量的纵向距离; v 为车辆速度; a 为车辆加速度; η 为车辆发动机输入量,具体可表示为:

$$\eta = m \cdot a_{des} + C_d \cdot v^2 + d_m + 2\tau \cdot C_d \cdot v \cdot a \quad (7)$$

$f(v, a)$ 和 $g(v)$ 分别可表示为:

$$f(v, a) = \frac{-2C_d}{m} \cdot v \cdot a - \frac{1}{\tau(v)} \left[a + \frac{C_d}{m} \cdot v^2 + \frac{d_m}{m} \right] \quad (8)$$

$$g(v) = \frac{1}{m \cdot \tau(v)} \quad (9)$$

式(7)~式(9)中, m 为车辆质量; τ 为发动机时间常数; C_d 为气动阻力系数; d_m 为机械阻力; a_{des} 为上层所决定的期望加速度。

采用式(7)表示的车辆发动机输入量控制规律,对模型进行反馈线性化^[8]。将式(7)~式(9)带入式(6)中得到线性化后的模型:

$$\dot{a} = -\tau^{-1} \cdot a + \tau^{-1} \cdot a_{des} \quad (10)$$

式(10)表明期望加速度 a_{des} 作为控制量输入到下层控制器,下层控制器通过控制节气门开度或制动力大小进而控制车辆的实际加速度,实现对该期望加速度的追踪。

4 基于 MPC 的纵向跟车控制器设计

4.1 基于固定纵向车头时距的安全车距策略

安全车距策略决定了跟车行驶过程中的期望跟车距离,目前应用广泛的方法是固定两车间距策略,在该策略中期望本车与前车之间保持固定车距 d_r ,即:

$$d_{des} = d_r \quad (11)$$

其中, d_{des} 为期望车距。可看出在此安全车距策略中期望车距是一常量, 与相对车速、相对加速度无关, 故跟车行驶时乘车舒适性难以得到保证。

为解决以上不足, 本文采用基于固定纵向车头时距的安全车距策略。纵向车头时距指同一车道上行驶相同方向的连续两车的车头经过同一地点的时间差值。在此安全车距策略中, 车辆的行驶速度以及车头时距都会成为影响期望车距的因素, 此时期望车距的表达式可写为:

$$d_{des} = d_0 + h \cdot v \quad (12)$$

其中, h 为纵向车头时距, v 为车辆的实际速度。

由式(12)可知, 当固定纵向车头时距时, 前车

车速增大, 期望距离也会增大; 相较于固定两车间距策略, 固定纵向车头时距策略可根据车速调整期望距离, 更符合行车安全性要求。

4.2 模型预测控制策略设计

模型预测控制(model predictive control, MPC)的基本原理是在每一个历史采样瞬间通过对有限时域开环最优控制问题进行求解, 来选择当前的控制动作^[9]。在具体跟车过程中, MPC 控制器分析求解出第一个采样变量并运用到控制车辆后, 控制器再次采样, 用新的采样值刷新最优化问题并重新求解, 以实现对车辆系统动态行为的预测和展示^[10-11]。基于 MPC 的纵向跟车 ACC 控制流程如图 2 所示。

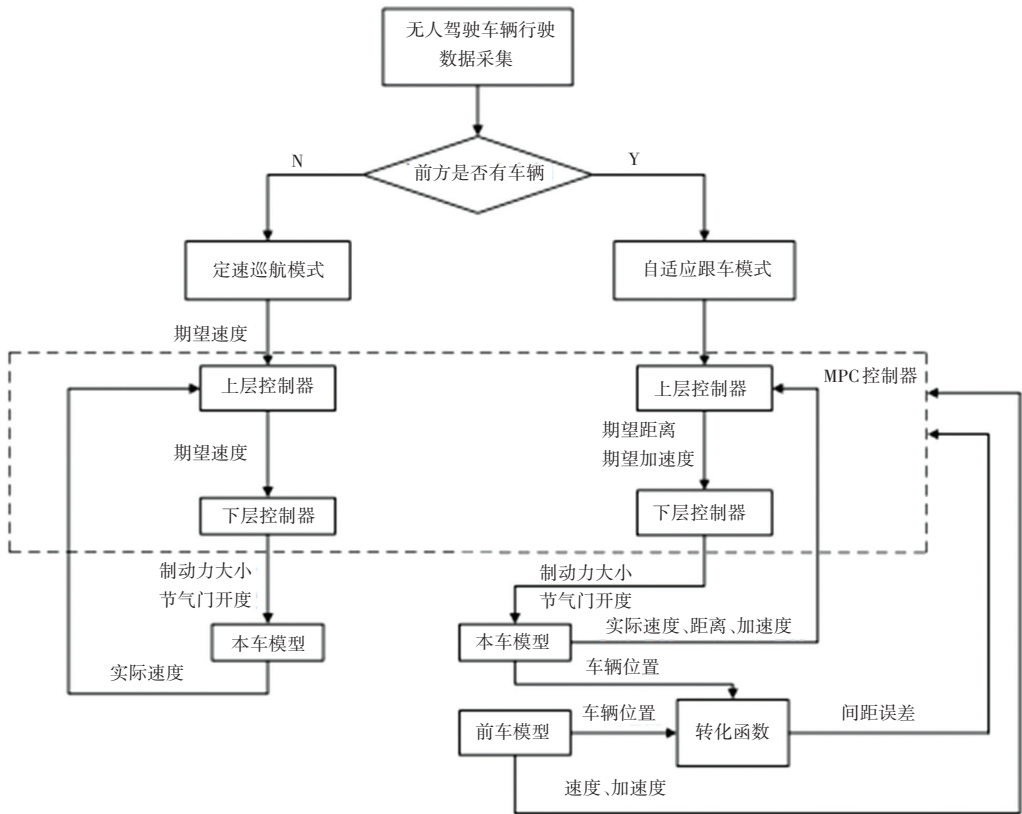


图 2 基于 MPC 的纵向跟车 ACC 控制流程

Fig. 2 ACC control process of longitudinal car-following based on MPC

图 2 中, 本车模型可表示为:

$$G(s) = \frac{1}{s^2(\tau \cdot s + 1)} \quad (13)$$

本车、前车位置通过转化函数转化为间距误差输入到控制器, 该转化函数可表示为:

$$H(s) = 1 + h \cdot s \quad (14)$$

式(13)~式(14)中, τ 和 h 分别表示前述的发动机时间常数和纵向车头时距。在采样时刻, 间距

误差与两车的速度、加速度数据作为输入量传递到控制器, 控制器对数据进行处理, 优化求解出当前时刻的控制数据应用到本车^[7,12]。

5 仿真分析

为验证 MPC 控制器对于控制无人驾驶车辆跟车行驶的实际效果, 搭建 Matlab/Carsim 联合仿真平台模拟无人驾驶车辆纵向跟车行驶工况。表 1 为在

Carsim 软件中搭建车辆模型所选用的参数。

表 1 Carsim 车辆参数

Tab. 1 Carsim vehicle parameters

参数	数值
整车质量 m / kg	1 110
汽车迎风面积 A / m^2	1.60
空气阻力因数 C_d	0.30
滚动阻力因数 f	0.05
轮胎半径 r_w / m	0.325
主减速器传动比 i_0	4.10
空气密度 ρ / ($kg \cdot m^{-3}$)	1.206

仿真过程中,当未检测到前方车辆时,无人驾驶车辆按照设定期望速度进行定速巡航;当检测到前方车辆时,无人驾驶车辆将通过自适应巡航进行跟车行驶,仿真过程如图 3 所示。

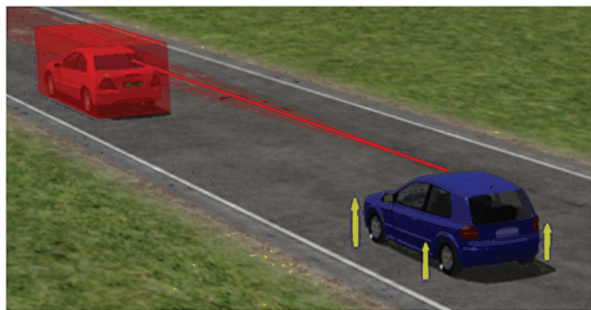
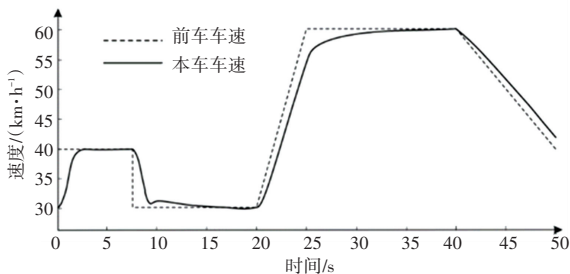


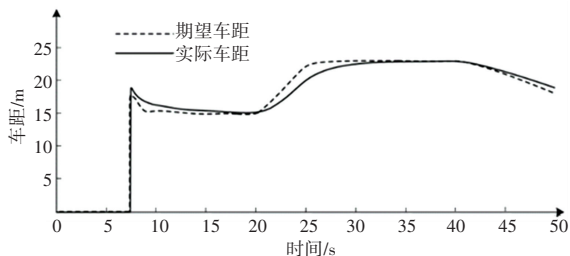
图 3 Carsim 仿真过程

Fig. 3 Carsim simulation process

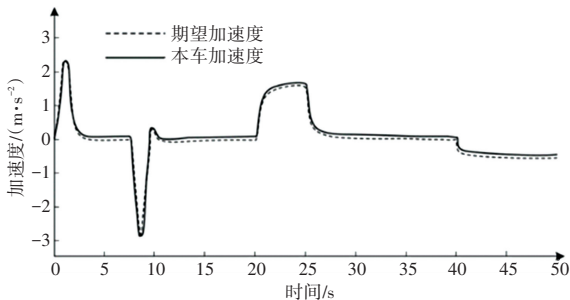
设置本车初始速度为 30 km/h,定速巡航速度为 40 km/h,前车初始速度为 40 km/h,仿真时间 50 s。仿真开始本车加速到 40 km/h 后保持定速巡航;7.5 s 时刻设置前车变道并将速度降到 30 km/h,以模拟前车瞬间减速变道的危险工况,此时实际车距为 18.5 m,本车开始跟车行驶,直至仿真结束。仿真得到本车车速与前车车速对比结果、实际车距与期望车距对比结果以及本车加速度与期望加速度对比结果,如图 4 所示。



(a) 本车车速与前车车速对比



(b) 实际车距与期望车距对比



(c) 本车加速度与期望加速度对比

图 4 仿真结果

Fig. 4 The simulation results

由图 4(a)可知,前方无车时,本车按照设定的巡航速度行驶,前方出现低速车辆时,本车减速开始跟车行驶,7.5 s 后本车与前车速度趋于一致,故能做到稳定的速度跟随。由图 4(b)可知,在 7.5 s 时刻前方瞬间出现低速车辆的工况下,本车立即减速以使实际车距跟随期望车距;在随后本车跟车行驶过程中遇前车加速、减速的工况下,实际车距能稳定跟随期望车距,满足安全性要求。由图 4(c)可知,本车实际加速度绝对值在前车突然减速变道的危险工况下仍能保持在 $3 m/s^2$ 之内,满足乘车舒适条件。

6 结束语

基于 MPC 原理设计无人驾驶车辆纵向跟车控制器,并分别从速度、车距、加速度方面对乘车安全性及舒适性进行仿真分析。结果表明,车辆在定速巡航和自适应巡航两种工况下均能达到稳定的速度跟随;在危险工况下仍能满足车距安全性要求,且全程加速度均保持在舒适范围内。综上所述,基于 MPC 的无人驾驶车辆跟车控制器跟踪精度高,跟车行驶稳定性好,能够满足乘车安全性及舒适性要求,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 刘新月. 城市交通事故数据中局部模式的可视分析方法研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2020.