

考虑执行器时滞不确定的车辆编队网联巡航 鲁棒模型预测控制

张浩彬, 张 宁, 徐利伟, 王金湘, 殷国栋

(东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

摘要: 针对车辆编队中执行器时滞的不确定性,提出了一种基于鲁棒模型预测控制的新的车辆编队网联巡航控制方法。该方法能够实时处理编队安全约束,并兼顾车辆编队的弦稳定性与对执行器时滞的鲁棒性。首先,建立车辆编队的数学模型与网联巡航模型预测控制的控制架构,分析无约束条件下网联巡航模型预测控制的线性反馈特性。其次,基于 H_∞ 控制分析网联巡航线性系统对执行器时滞不确定的鲁棒性,得到车辆编队 L_2 弦稳定性的实现条件。然后,通过控制器参数匹配,根据满足编队稳定性、鲁棒性要求的线性反馈参数对模型预测控制器的优化权重进行调整。通过不同执行器时滞的车辆编队系统仿真,结果表明,本文提出的控制方法简化了工程应用中相应的控制器参数匹配工作,进一步提高了车辆编队网联巡航控制系统的功能稳定性与安全性。

关键词: 车辆编队;网联巡航控制;编队稳定性;鲁棒模型预测控制

中图分类号: U461.6

文献标志码: A

Connected Cruise Control of a Vehicle Platoon with Uncertain Actuator Delays Based on Robust Model Predictive Control Method

ZHANG Haobin, ZHANG Ning, XU Liwei, WANG

Jinxiang, YIN Guodong

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Considering the uncertainties of actuator delays in a vehicle platoon, a novel connected cruise control based on robust model predictive control method is proposed. The approach deals with the safety constraints in transients, and accommodates vehicle platoons string stability and robustness against uncertain actuator delays. The mathematical model of a connected

vehicle platoon is established and its control architecture for platoon cruising is proposed. Then, the linear feedback characteristics of model predictive control (MPC) under unconstrained conditions are analyzed. Adopting H_∞ control method, the robustness to the uncertainties of actuator delays is analyzed, and the realization conditions of L_2 string stability are obtained. Finally, a controller matching approach is applied to tune the weight matrix of MPC according to the linear feedback law obtained. The simulation results show that the proposed control method simplifies the controller matching in engineering applications and further improves the functional stability and safety of the connected cruise control for vehicle platoon.

Key words: vehicle platoon; connected cruise control; platoon stability; robust model predictive control

随着汽车保有量与人口集中流动规模的增加,高速公路的运力对交通系统构成了限制,交通阻塞状况日益突出,交通事故风险大大提高。在有限的交通容量下,如何提高交通效率、降低交通事故风险成为当下亟待解决的问题。车辆编队被广泛认为是解决方法之一。紧密编队行驶的车辆可以极大地缩减行驶间距,大幅提高道路交通流量^[1-2],同时利用编队整体降低空气阻力的影响,显著提高车辆燃油经济性^[3]。

车辆编队的稳定性是保证车辆编队安全运行的必要条件。除了车辆跟随前车行驶时需具备的稳定性外,车辆编队亦需具备弦稳定性,即前车产生的扰动能够沿着车辆编队逐渐衰减。文献中已有许多关于弦稳定性的定义^[4],如 Naus 等^[5]研究了异构车辆编队在频域内的稳定性问题,通过建立车辆实际位

收稿日期: 2022-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(52072072);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242022R40070)

第一作者: 张浩彬(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为智能网联汽车。E-mail: hobartzhong@seu.edu.cn

通信作者: 张宁(1985—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为运载系统动力学及其智能化。E-mail: nzhang_cn@seu.edu.cn

论
文
拓
展
介
绍

置和理想位置之间的传递函数关系,推导了频域内车队保持弦稳定性的充要条件。Ploeg 等^[6]提出了 L_p 弦稳定性的定义,该定义适用于线性系统与非线性系统,同时考虑了初始条件扰动和外部扰动,且与编队的通讯拓扑结构无关。

目前车辆编队的控制方法主要采用线性反馈控制^[5-8]。线性控制下车队编队的局部稳定性和弦稳定性的分析较为方便,但线性控制无法考虑执行器饱和和等约束条件。模型预测控制(model predictive control, MPC)能够在满足输入与状态约束的同时,考虑舒适性、燃油消耗等多种性能指标,但难以直接对编队的弦稳定性进行设计。Dunbar 等^[9]通过 MPC 约束条件的设计,保证了车辆编队的弦稳定性,但弦稳定性约束同时也限制了编队系统的动态性能。另一种弦稳定性设计方法是将满足弦稳定性的线性控制律与无约束的线性 MPC 进行匹配,调整后的 MPC 在约束未激活时仍继承了线性控制器的灵敏度、鲁棒性等闭环频域特性,同时在瞬态过程中仍能够最优地处理系统约束^[10-11]。然而,在实际交通场景中,除了编队系统实际存在的约束以外,由于发动机时间常数、车辆质量等参数的不确定性与运行过程中路面不平度、阵风等干扰,车辆节点地执行器时滞并不能准确获取,如何应对执行器的不确定性,对维持编队系统稳定性、保证编队系统安全运行具有重要意义。

针对实际工程中不可避免的车辆执行器时滞不确定问题,本文提出了一种车辆编队网联巡航的鲁棒模型预测控制方法。首先建立了车辆编队的数学模型与网联巡航的 MPC 控制架构,分析了无约束条件下 MPC 的线性反馈特性。采用 H_∞ 控制方法分析线性系统对执行器时滞不确定的鲁棒性,并基于 L_2 弦稳定性的对编队的弦稳定性进行验证。基于满足弦稳定性与鲁棒性要求的线性反馈系统参数,通过控制器参数匹配对 MPC 的优化权重进行调整。最后对由具有不同执行器时滞车辆组成的编队进行仿真,验证了本文提出的控制方法的有效性。

1 车辆编队系统建模

本文主要考虑高速公路上的“一字型”车辆编队,如图 1 所示。编队包括一领航车辆,编号为 0,其余车辆跟随前车行驶。采用固定时距的跟车策略,即车辆编队中第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车质心间的理想车间距为:

$$d_{\text{des},i}(t) = s_i + hv_i(t) \quad (1)$$

式中: s_i 为静止车距, v_i 为车辆速度,假定车辆编队中车头时距 h 对所有车辆都是相同的。可以得到当前第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车质心间车间距与理想车间距的误差为

$$e_i(t) = d_i(t) - d_{\text{des},i}(t) = (x_{i-1}(t) - x_i(t) - L_i) - (s_i + hv_i(t)) \quad (2)$$

式中: L_i 为第 i 辆车与第 $i-1$ 辆车质心间车身长度。在编队系统中,常用如下一阶模型近似描述编队中的车辆节点动力学^[12]:

$$\dot{a}_i = -\frac{1}{\tau_i} a_i + \frac{1}{\tau_i} u_i + \delta_i \quad (3)$$

式中: a_i 为第 i 辆车的加速度, u_i 为第 i 辆车的控制输入, τ_i 为代表动力传动系统的时间常数。由于发动机时间常数、车辆质量等参数的不确定性与运行过程中路面不平度、阵风等干扰,车辆节点的执行器时滞难以准确获取, δ_i 代表车辆执行器的不确定性,其值未知但有界。令 $X_i = [v_i, a_i, e_i]^T$ 为编队系统状态量,可得状态空间方程:

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i u_i + B_v v_{i-1} + B_w \delta_i \quad (4)$$

其中:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_i} & 0 \\ -1 & -h & 0 \end{pmatrix}, B_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\tau_i} \\ 0 \end{pmatrix}, B_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, B_w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

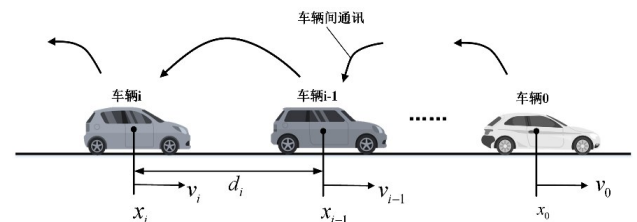


图 1 车辆编队系统

Fig 1 Vehicle platoon system

2 鲁棒模型预测控制

本文提出的基于鲁棒模型预测控制的编队网联巡航控制方案如图 2 所示。与传统的 MPC 相同,鲁棒模型预测控制器基于传感器测得的状态信息与通过 V2V 获得的来自前车的前馈信号,根据系统状态空间方程预测系统未来动态,然后在线滚动求解优化问题,通过系统的输出值修正当前时刻的系统状态。不同之处在于,鲁棒模型预测控制基于满足编队系统稳定性、鲁棒性的线性控制律,通过控制器参数匹配,对 MPC 目标函数的优化权重进行调整。

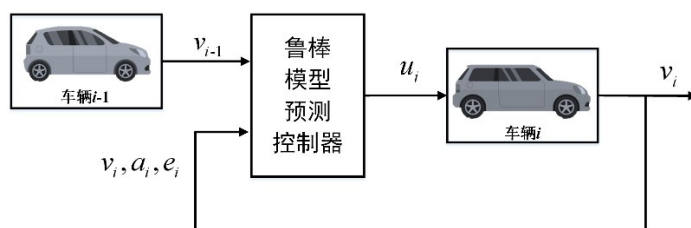


图2 车辆编队控制方案

Fig 2 Control scheme of vehicle platoon system

2.1 目标函数设计

为了MPC实现编队系统的控制,对系统状态空间(4)进行离散化处理,采样时间为 t_s 。设计每个采样时刻 $t=kt_s$ 的目标函数为

$$J(k) = \sum_{i=1}^n X_i^T(k+i|k) Q_i X_i(k+i|k) + \sum_{j=1}^m R_i u_i^2(k+j-1|k) \quad (5)$$

式中: n 代表预测时域, m 代表控制时域; $Q_i \geq 0$ 、 $R_i > 0$ 分别为系统状态与控制输入的优化权重。考虑到车辆执行器与编队运行安全,对车辆的瞬时状态与控制输入进行限制:

$$e_{\min} \leq e_i \leq e_{\max} \quad (6a)$$

$$u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max} \quad (6b)$$

假设车辆编队模型精确,通过在式(6)的约束范围内对目标函数式(5)进行求解,控制输入 u_i 可以由一隐性控制律 $h(X_i, v_{i-1})$ 表示。不考虑约束,当 m 、 n 趋近于无穷时, $h(X_i, v_{i-1})$ 可以用式(7)估计^[13]:

$$u_i = k_i X_i + k_{f,i} v_{i-1} \quad (7)$$

式中: $k_i = [k_{v,i}, k_{a,i}, k_{e,i}]^T$ 为状态反馈增益; $k_{f,i}$ 为车速前馈增益,其数值可由式(8)计算:

$$k_i = -R_i^{-1} B_i^T P_i \quad (8a)$$

$$k_{f,i} = -R_i^{-1} B_i^T [(A_i - R_i^{-1} B_i B_i^T P_i)^T]^{-1} P_i B_v \quad (8b)$$

$$P_i A_i + A_i^T P_i - P_i B_i R_i^{-1} B_i^T P_i = Q_i \quad (8c)$$

基于上述方法,可根据线性控制器参数对MPC的目标优化参数进行调整,调整后的MPC在约束未激活时仍继承了线性控制器的灵敏度、鲁棒性等闭环频域特性,同时在瞬态过程中仍能够最优地处理系统约束。在MPC优化权重的实际选取过程中,预先设置了权重 Q_i 、 R_i 的取值范围,然后通过对其进行多次迭代,得到满足系统鲁棒控制性能的可行解范围,从而进一步选取使得系统控制性能最优的MPC优化权重。

2.2 H_∞ 鲁棒控制器设计

由于车辆自身模型参数的不确定性与外部干扰,车辆节点的执行器时滞通常并不能准确获取,在控制器设计过程中对其的忽视可能导致系统性能的

劣化,因此车辆编队的控制器应能应对执行器的不确定性并保证系统的性能不会恶化太多。本文基于 H_∞ 方法对系统鲁棒性进行分析。将控制律式(7)代入系统状态空间方程式(4),暂不考虑来自前车的前馈输入 v_{i-1} ,可以得到如下闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{X}_i = A_{i,cl} X_i + B_w \delta_i \\ v_i = C X_i + D \delta_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: $A_{i,cl} = A_i + B_i k_i$; $C = [0 \ 1 \ 0]$; $D = 0$ 。若存在一个对称矩阵 $P > 0$ 满足^[14]:

$$\begin{bmatrix} A_{i,cl}^T P + P A_{i,cl} & P B_w & C^T \\ B_w^T P & -\gamma^2 I & D^T \\ C & D & -I \end{bmatrix} < 0$$

或

$$\begin{bmatrix} A_{i,cl}^T P + P A_{i,cl} & P B_w + C^T D \\ B_w^T P + D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

则 A 是稳定的且从干扰输入 δ_i 到输出 v_i 的 H_∞ 范数

$$\|G\|_\infty = \sup_{\omega} \frac{\|v_i\|_{L_2}}{\|\delta_i\|_{L_2}} < \gamma. \quad \text{这反映了在有界能量输入下,被控系统的输出信号与输入信号的能量之比小于}\gamma,$$

体现出从干扰 $\delta_i(t)$ 到输出 $v_i(t)$ 的抗干扰能力。

2.3 队列弦稳定性分析

为保证车辆编队的弦稳定性,采用 L_2 弦稳定性的定义^[5]。对于线性时不变编队系统,若由第 $i-1$ 辆车的车速 v_{i-1} 到第 i 辆车车速 v_i 的传递函数 G_i 满足:

$$\|G_i\|_\infty = \sup_{\omega} \frac{\|v_i\|_{L_2}}{\|v_{i-1}\|_{L_2}} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots \quad (11)$$

则车辆编队满足强弦稳定性。

$G_{i,\delta}$ 为车辆执行器不确定性 δ_i 到第 i 辆车车速 v_i 的传递函数。由式(4)和式(7)可得

$$v_i(s) = G_i v_{i-1}(s) + G_{i,\delta} \delta_i(s) \quad (12)$$

由式(12)可以看出, $G_{i,\delta}$ 为 G_i 的补灵敏度^[15]。由式(10)得 $\|G_{i,\delta}\|_\infty < \gamma$,当 $0 < \gamma < 1$ 时,可以得到

$$\|G_i\|_\infty = \|I - G_{i,\delta}\|_\infty \leq 1 \quad (13)$$

显然,当 $0 < \gamma < 1$ 时,系统满足强弦稳定性。

3 车辆编队网联巡航控制的仿真分析

本节采用 Matlab 软件进行异质编队的数值仿真,以验证本文提出的控制方法的有效性。通常乘用车的发动机时间常数介于 $0.2 \sim 0.3 \text{ s}$ ^[16],为了充分验证本文提出的控制方法对执行器时滞不确定性的鲁棒性,本文执行器时滞取值范围为 $0 \sim 1 \text{ s}$ ^[17]。控制器设计过程中采用的参数如表 1 所示。仿真环境设置为:①异质队列系统中共含 5 辆车,包括 1 辆领航车与 4 辆跟随车;②初始时刻相邻车辆间的车间距误差及其导数均为 0,车辆质心间距离为 10 m;③第 1 辆到第 4 辆车的执行器时滞分别为 0.5 s、0.9 s、0.7 s、0.4 s。

表 1 控制器设计参数

Tab.1 Parameters adopted in controller design

参数	名称	单位	数值
τ_i	车辆响应时间常数	s	0.1
h	车头时距	s	0.5
s_i	静止车距(质心间)	m	10
e_{max}/e_{min}	最大车距误差/最小车距误差	m	5/-2
u_{max}/u_{min}	最大控制输入/最小控制输入	m/s^2	3.5/-5

假设车辆初始速度均为 0,在 $t=5 \text{ s}$ 时领航车以 3 m/s^2 加速至 86 km/h 后开始匀速行驶,在 $t=19 \text{ s}$ 时以 -4 m/s^2 减速至静止。在此领航车速度波动下,所得到的仿真结果如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,各车辆均能完成对领航车车速的跟踪,同时车速的波动并未沿着队列方向放大,说明在执行器时滞存在较大误差的情况下,编队仍保持了弦稳定性。图 3(b)中各车辆的加速度曲线也表现出类似的特性。在图 3(c)中,车辆跟随前车的车间距误差同样并未沿着队列方向放大,同时在 MPC 预设的约束范围内,保证了车辆编队的安全运行。仿真结果充分说明,在本文提出的鲁棒模型预测控制作用下,车辆编队能够有效应对执行器的不确定性,并保证编队系统的稳定性与安全性。

4 结论

在实际交通场景中,由于发动机时间常数、车辆质量等参数的不确定性与运行过程中路面不平度、阵风等干扰,单一道路车辆的执行器时滞难以准确获取,对车辆编队稳定性及运行安全构成威胁。针对这一问题,本文提出了一种基于鲁棒模型预测控制的新的车辆编队网联巡航控制方法,在应对节点车辆执行器的不确定性的同时确保编队的稳定性不

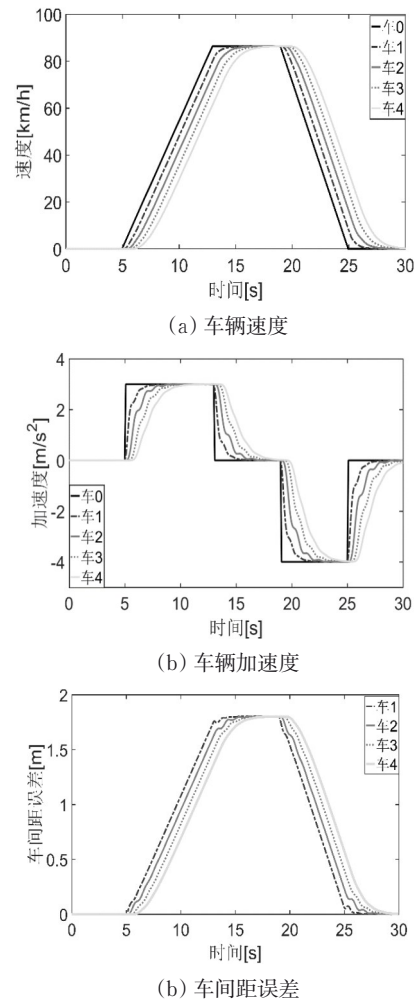


图 3 车辆编队仿真结果

Fig 3 Simulation results of vehicle platoon system

会恶化过多,并在执行器时滞不确定性较大的情况下,通过系统仿真验证该控制方法的有效性。该方法简化了工程应用中相应的控制器参数匹配工作,进一步提高了车辆编队网联巡航控制系统的功能稳定性与安全性。本文的主要结论如下:

(1) 建立了车辆编队的数学模型与网联巡航的 MPC 控制架构,并在无约束、无限时域条件下得到了 MPC 的线性反馈特性。

(2) 采用 H_∞ 控制方法分析了线性反馈系统对执行器时滞不确定的鲁棒性,并基于 L_2 弦稳定性对编队弦稳定性验证,由满足弦稳定性、鲁棒性要求的线性反馈系统参数对 MPC 的优化权重进行调整。

(3) 对由具有不同执行器时滞车辆组成的编队进行仿真,结果表明编队系统仍保持了弦稳定性,同时各状态参数仍在预设约束范围内,说明本文提出的鲁棒模型预测控制方法能够保证编队系统的稳定性、鲁棒性。

参考文献:

- [1] Van AREM B, Van DRIEL C J G. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic flow characteristics [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 4(7):429.
- [2] QIN Y, LI S. String stability analysis of mixed CACC vehicular flow with vehicle-to-vehicle communication [J]. IEEE Access, 2020, 8:174132.
- [3] ALAM A, BESSELINK B, TURRI V, *et al.* Heavy-duty vehicle platooning towards sustainable freight transportation: a cooperative method to enhance safety and efficiency [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2015, 36:34.
- [4] FENG S, ZHANG Y, LI S E, *et al.* String stability for vehicular platoon control: definitions and analysis methods [J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47:81.
- [5] NAUS G J L, VUGTS R P A, PLOEG J, *et al.* String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9):4268.
- [6] PLOEG J, Van de WOUW N, NIJMEIJER H. L_p string stability of cascaded systems: application to vehicle platooning [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2):786.
- [7] OROSZ G. Connected cruise control: modelling, delay effects, and nonlinear behaviour [J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(8):1147.
- [8] QIN W B, GOMEZ M M, OROSZ G. Stability and frequency response under stochastic communication delays with applications to connected cruise control design [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(2):388.
- [9] DUNBAR W, CAVENEY D. Distributed receding horizon control of vehicle platoons: stability and string stability [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(3):620.
- [10] KIANFAR R, FALCONE P, FREDRIKSSON J. A control matching model predictive control approach to string stable vehicle platooning [J]. Control Engineering Practice, 2015, 45: 163.
- [11] ZHOU Y, WANG M, AHN S. Distributed model predictive control approach for cooperative car-following with guaranteed local and string stability [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 128: 69.
- [12] ZHOU Y, AHN S. Robust local and string stability for a decentralized car following control strategy for connected automated vehicles [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 125:175.
- [13] Di CAIRANO S, BEMPORAD A. Model predictive control tuning by controller matching [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(1):185.
- [14] SCHERER C, GAHINET P, CHILALI M. Multiobjective output-feedback control via LMI optimization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(7):896.
- [15] XU L, ZHUANG W, YIN G, *et al.* Modeling and robust control of heterogeneous vehicle platoons on curved roads subject to disturbances and delays [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12):11551.
- [16] GRATZER A L, THORMANN S, SCHIRRE A, *et al.* String stable and collision-safe model predictive platoon control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 19358.
- [17] DAVIS L C. Optimality and oscillations near the edge of stability in the dynamics of autonomous vehicle platoons [J]. Physica A, 2013, 392(17): 3755.