

基于 Simulink 的车辆横向控制模型软件的分析

邢海涛, 梁 威

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

✉ haitaoxing2022@126.com; Wei_Liang222@126.com



摘 要:为了探究不同参数对采用 MPC(Model Predictive Control)控制的车辆定速巡航功能的影响,建立了车辆横向控制模型。首先对车辆动力学 MPC 模型进行理论推导,得出相应的公式;然后采用 Simulink 软件搭建闭环模型进行仿真。通过调整不同的参数并对比发现:减小控制前轮转角约束系数的值,会增大车辆的横向偏差和航向角偏差;当道路的曲率改变时,其他参数的调整会引起车辆横向偏差和航向角偏差曲线的振荡。仿真曲线结果表明:前轮转角约束系数是车辆开启功能后能否安全行驶的关键,而其他参数则可以极大地改善车辆的性能,提升行驶时车身的稳定性。

关键词:定速巡航;MPC;Simulink

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A

Parameter Analysis of Vehicle Lateral Control Model Software Based on Simulink

XING Haitao, LIANG Wei

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

✉ haitaoxing2022@126.com; Wei_Liang222@126.com

Abstract: In order to explore the impact of different parameters on the cruise control function of vehicles controlled by MPC (Model Predictive Control), this paper proposes to establish a vehicle lateral control model. Firstly, the MPC model of vehicle dynamics is theoretically deduced, and the corresponding formula is obtained. Then, Simulink software is used to build a closed-loop model for simulation. By adjusting different parameters and comparing them, it is found that reducing the value of the constraint coefficient for controlling the steering angle of front wheel will increase the lateral deviation and heading angle deviation of the vehicle. When the curvature of the road changes, adjustments to other parameters can cause oscillations in the lateral deviation and heading angle deviation curves of the vehicle. The simulation curve results indicate that the constraint coefficient of front wheel steering angle is the key to whether the vehicle can be driven safely when the function is turned on, while other parameters can greatly improve the performance of the vehicle and enhance the stability of the body during driving.

Key words: cruise control; MPC; Simulink

0 引言(Introduction)

各种辅助驾驶技术的出现,使得汽车的行驶更加安全高效。自动驾驶汽车的自动紧急制动、前后碰撞预警、变道辅助、盲区检测、自适应巡航和车道居中保持等功能的实现都依赖于

汽车软件的控制^[1-7]。其中,MPC算法可以单独使用进行轨迹控制,或者用于提升汽车控制的稳定性和抗干扰性,也可以结合模糊控制用于汽车的路径跟踪^[8-12]。

汽车底层的控制软件直接与汽车的硬件相关联,并在汽车

行驶途中计算出理想的前轮转角角度,用于控制汽车的方向盘转动,控制软件性能对汽车的安全行驶具有重要影响;而软件的性能又是由算法中不同参数共同决定的,所以本文采用 Simulink 软件建立汽车横向控制模型,着重分析车辆动力学 MPC 算法中不同参数对车辆控制性能的影响。

1 车辆控制模型(Vehicle control model)

汽车的横向控制模型采用线性二自由度动力学模型,如图 1 所示。

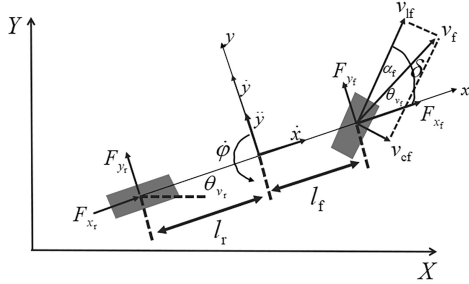


图 1 车辆的横向动力学模型

Fig. 1 Lateral dynamics model of the vehicle

汽车的横向动力学模型公式^[7]为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \dot{y} \\ \hat{\phi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2C_{af}+2C_{ar}}{m \cdot v_x} & \frac{2C_{af}+2C_{ar}}{m} & \frac{2l_r C_{ar}-2l_f C_{af}}{m \cdot v_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2l_r C_{ar}-2l_f C_{af}}{I_z \cdot v_x} & \frac{2l_f C_{af}-2l_r C_{ar}}{I_z} & \frac{2l_f^2 C_{af}-2l_r^2 C_{ar}}{I_z \cdot v_x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \dot{y} \\ \hat{\phi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{af}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_f \cdot C_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2l_r C_{ar}-2l_f C_{af}}{m \cdot v_x} - v_x \\ 0 \\ \frac{2l_f^2 C_{af}+2l_r^2 C_{ar}}{I_z \cdot v_x} \end{bmatrix} \dot{\phi}_{des} \quad (1)$$

对公式进行离散化处理定义的输出方程为

$$y = \bar{A} \hat{x} + \bar{B} \delta + \bar{G} \quad (2)$$

公式(2)中,预测步长为 N_p ,输出步长为 N_c ,其中输出步长 N_c 的最大值为 N_p-1 。为了更好地对此方程求解,可以把公式(2)转化为二次型,化简为以下形式:

$$J = u^T H u + f u \quad (3)$$

将公式(3)变量展开为 $Q_Q = I_{N_p} \otimes Q, R_R = I_{N_p} \otimes R, H = \bar{B} Q_Q \bar{B}^T + R_R, f = 2E^T Q_Q \bar{B}, E = \bar{A} \cdot \hat{x} + \bar{G} \cdot EHR - y_{ref}$,

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} qa & 0 & 0 & 0 \\ 0 & qb & 0 & 0 \\ 0 & 0 & qc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & qd \end{bmatrix},$$

$$y_{ref} = \begin{bmatrix} ref \cdot \hat{x} \\ ref^2 \cdot \hat{x} \\ \vdots \\ ref^{N_p} \cdot \hat{x} \end{bmatrix}, EHR = \begin{bmatrix} (v_x/r) \cdot 0.5^{1-1} \\ (v_x/r) \cdot 0.5^{2-1} \\ \vdots \\ (v_x/r) \cdot 0.5^{N_c-1} \end{bmatrix}$$

qa, qb, qc 和 qd 分别为横向偏差期望参考系数、横向偏差变化率期望参考系数、航向角偏差期望参考系数和航向角偏差变化率期望参考系数。 ref 为理论偏离坐标点的权重,一般情况下其值为 0,代表不偏离。

在二次型的求解过程中,为了使求解的结果满足期望值,需要对控制量施加合适的约束条件,即需要满足以下条件:

$$u_{\min}(t+k) \leq u(t+k) \leq u_{\max}(t+k), k=0,1,\dots,N_{c-1}$$

在实际应用中, $u_{\min}$ 和 $u_{\max}$ 一般进行人工设置,即 $u_{\min} = -1.744 \times 10^{-2} \cdot carU$ 和 $u_{\max} = 1.744 \times 10^{-2} \cdot carU$,单位是 rad, $carU$ 为控制前轮转角约束的参数系数。方程求解之后的第一项作为实际的控制输入作用于转向。

当车辆的横向控制软件采用 MPC 算法时,还会加入前馈用于防止模型失配或者外界干扰导致的控制输出与期望差距过大。输入的前馈控制与车辆速度以及道路曲率相关,具体表现为以下公式^[7]:

$$\delta_{ff} = \frac{l_f + l_r}{r} + \left[\frac{l_r \cdot m}{2C_{af} \cdot (l_f + l_r)} - \frac{l_f \cdot m}{2C_{ar} \cdot (l_f + l_r)} \right] \cdot \frac{v_x^2}{r} \quad (4)$$

假设 MPC 算法计算出的前轮转角用 δ_f 表示,那么整个车辆横向控制模型软件的前轮转角输出为

$$\delta = \delta_f + \delta_{ff} \quad (5)$$

2 仿真模型(Simulation model)

采用 Simulink 软件搭建车辆的横向控制仿真模型,如图 2 所示。车辆模型采用软件中内置的模块,需要设置的固定参数有车辆边缘到达质心的后轴长度 l_r 为 1.6 m 和前轴长度 l_f 为 1.2 m;车辆前轮的侧偏刚度 C_{af} 为 4.284×10^4 N/rad 和车辆后轮轮胎的侧偏刚度 C_{ar} 为 6.201×10^4 N/rad;车身质量 m 为 1.575×10^3 kg;车辆围绕车身坐标轴 z 轴的转动惯量 I_z 为 3.610×10^3 kg·m²。场景搭建的道路长度为 600 m,前 300 m 为直线车道,后 300 m 为道路曲率为 0.001 的弯道。

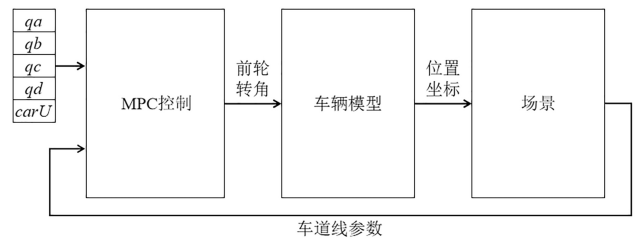


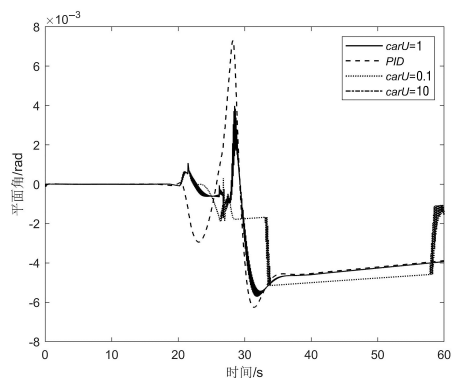
图 2 车辆闭环仿真模型

Fig. 2 Closed-loop simulation model of the vehicle

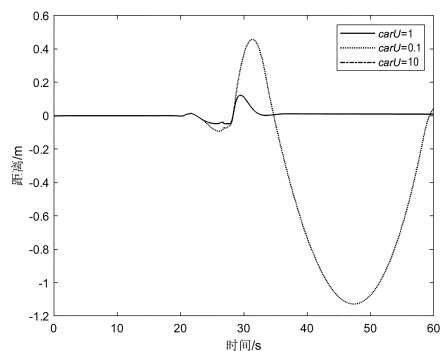
图 2 中的 qa, qb, qc, qd 和 $carU$ 五个系数是对 MPC 算法建模时需要的内设参数,其影响底层横向控制软件的综合性能。在开始仿真时,时间步长间隔为 0.1 s。默认预设横向偏差期望参考系数为 1.5、横向偏差变化率期望参考系数为 0.1、航向角偏差期望参考系数为 2、航向角偏差变化率期望参考系数为 0.1、控制前轮转角约束系数为 1。当各参考系数发生改变时,为了显示 MPC 对前轮转角控制效果的影响,还加入了 PID(Proportional, Integral, Derivative)控制进行对比。对于车道路线参数,均用三次多项式拟合。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

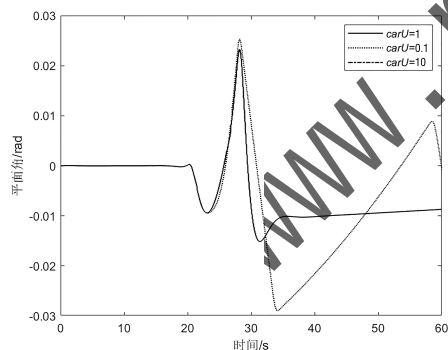
如图 3 所示,其中曲线图为只改变控制前轮转角约束系数大小时的仿真结果。如图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)所示的汽车设置车速为 10 m/s,如图 3(d)、图 3(e)和图 3(f)所示的汽车设置车速为 20 m/s。



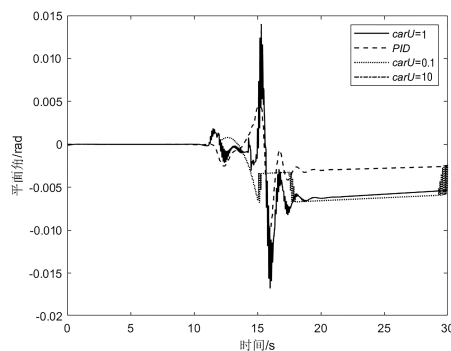
(a)车速为 10 m/s 时的前轮转角



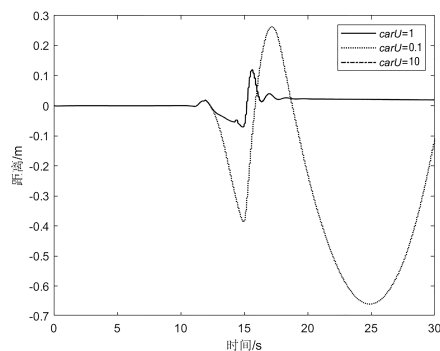
(b)车速为 10 m/s 时的横向偏差



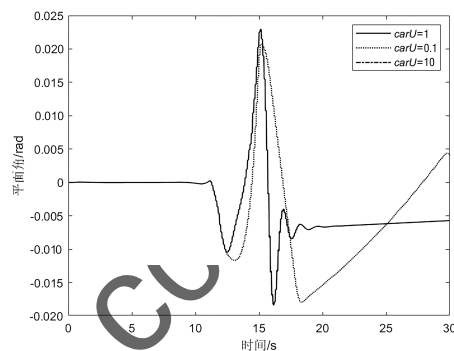
(c)车速为 10 m/s 时的航向角偏差



(d)车速为 20 m/s 时的前轮转角



(e)车速为 20 m/s 时的横向偏差



(f)车速为 20 m/s 时的航向角偏差

图 3 更改控制前轮转角约束系数的结果对比

Fig. 3 Results comparison of changing the constraint coefficients of the control front wheel steering angle

如图 3(a)所示的前轮转角结果图中,PID 控制的前轮转角突变为最大,在同一时刻的峰值是其对应的 MPC 控制的前轮转角约束系数为 1 的峰值的 2 倍左右。当车辆处于直道或者处于弯道时,PID 控制和 MPC 控制效果差别不大。当控制前轮转角约束系数缩小到原来的 1/10 时,在图 3(a)中能够清晰地看到前轮转角的转动范围变小。仿真曲线在直道上表现良好,但进入弯道后会在一个极短时间内有一个巨大的突变,表现为车辆方向盘的抖动以及车身的横向摇摆,此摇摆会极大地影响车内驾驶人员的驾乘感受,并且增大车辆失控的风险。从图 3(b)和图 3(c)中也能够明显地看出,当控制前轮转角约束系数缩小到原来的 1/10 时,汽车由直道进入弯道后,车辆的横向偏差和航向角偏差会变大,导致车辆处在弯道时出现横向偏移现象。当控制前轮转角约束系数放大 10 倍时,观察图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)的曲线没有明显的变化,即代表控制前轮转角约束系数放大时不会对车辆控制效果产生明显的影响。

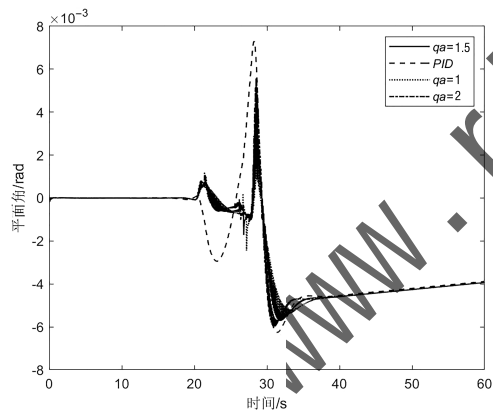
当把车辆的速度设置为 20 m/s 时,以同样的条件改变控制前轮转角约束系数的大小,结果如图 3(d)、图 3(e)和图 3(f)所示。此时,PID 控制和控制前轮转角约束系数为 1 的 MPC 控制效果差别不大,并且在车辆进入弯道后,PID 的控制效果比 MPC 的控制效果要好得多,其能够快速收敛,趋近于 0。当控制前轮转角约束系数缩小到原来的 1/10 时,其出现了与图 3(a)相同的变化,并且有两次短时间的巨大突变,表现为车辆方向盘抖动两次以及发生两次车身横向摇摆,但是抖动和摇摆幅度小于图 3(a)曲线的变化幅度。图 3(e)和图 3(f)中的峰值也不如

图 3(b)和图 3(c)的大。当控制前轮转角约束系数放大 10 倍时, 仿真结果与车速为 10 m/s 时的曲线一样, 没有明显的差别。

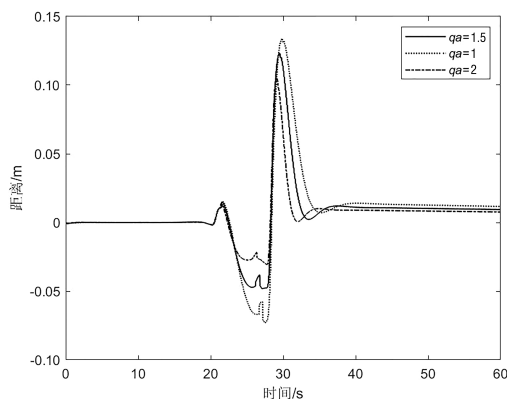
如图 4 所示, 曲线变化为只改变横向偏差期望参考系数大小的仿真结果。

如图 4(a)所示的前轮转角结果图中, PID 控制的前轮转角峰值依旧最大。横向偏差期望参考系数为 1.5 时, 为初始的默认值, 将横向偏差期望参考系数更改为 1 时, 可以观察到其峰值明显比横向偏差期望参考系数为 1.5 时要小, 但其收敛进入稳定状态的速度要慢得多, 并且会在直道行驶的末端, 进入弯道之前出现极短时间前轮转角突变的现象, 但幅度不大, 表现出一定的横向偏移现象, 从图 4(b)中也可以明显地看到横向偏差期望参考系数为 1 时, 车辆的横向偏差最大。当增大横向偏差期望参考系数为 2 时, 可以看到其峰值相比横向偏差期望参考系数为 1.5 时明显变大, 但是其收敛的速度要快速一些。如图 4(c)所示, 减小横向偏差期望参考系数值, 航向角偏差峰值减小, 收敛变慢; 增大横向偏差期望参考系数值, 收敛速度变快。

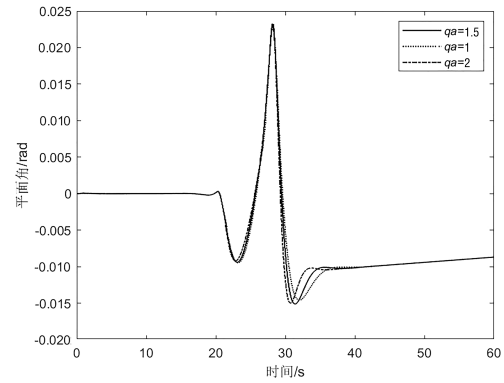
当把车辆的速度设置为 20 m/s 时, 以同样的条件改变横向偏差期望参考系数的值。图 4(d)出现的曲线变化与图 4(a)大致相同, 但其车速的增大, 使得比横向偏差期望参考系数为 1 时的前轮转角出现突变现象的幅度要大一些, 即横向偏移远一些。仿真曲线收敛速度慢, 在整个阶段的曲线波动要比其他情况稳定一些, 如图 4(f)所示。横向偏差期望参考系数为 2 时, 虽然收敛速度快, 但是增加了车身的的不稳定性, 图 4(d)、图 4(e)和图 4(f)中的曲线会出现振荡现象。



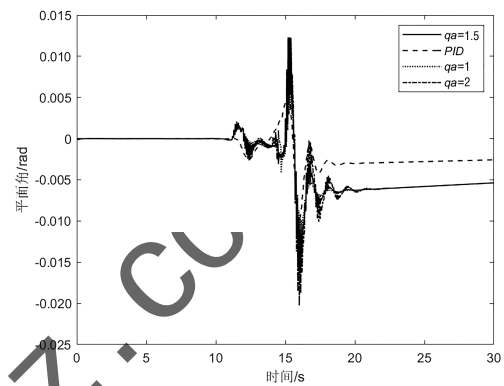
(a) 车速为 10 m/s 时的前轮转角



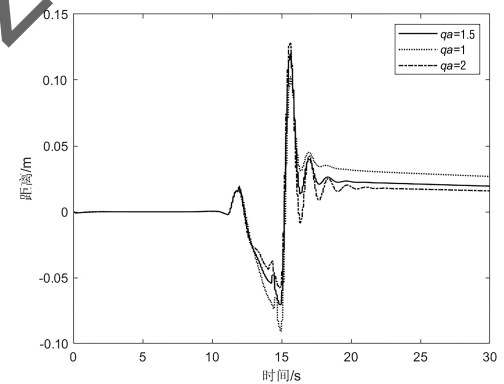
(b) 车速为 10 m/s 时的横向偏差



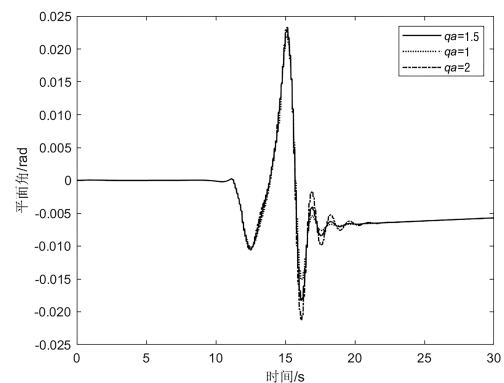
(c) 车速为 10 m/s 时的航向角偏差



(d) 车速为 20 m/s 时的前轮转角



(e) 车速为 20 m/s 时的横向偏差

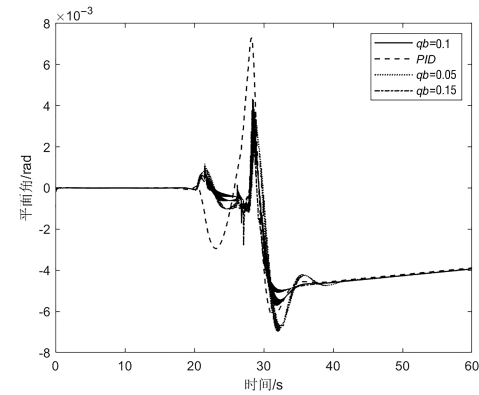


(f) 车速为 20 m/s 时的航向角偏差

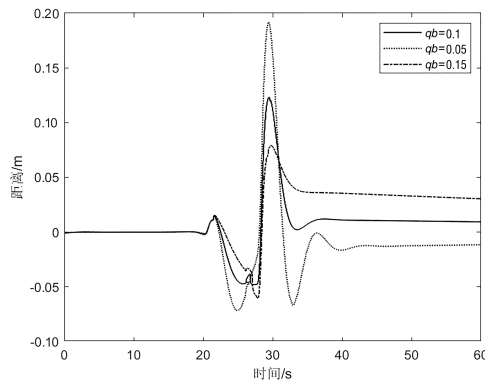
图 4 更改横向偏差期望参考系数的结果对比

Fig. 4 Results comparison of the expected reference coefficients for changing lateral deviation

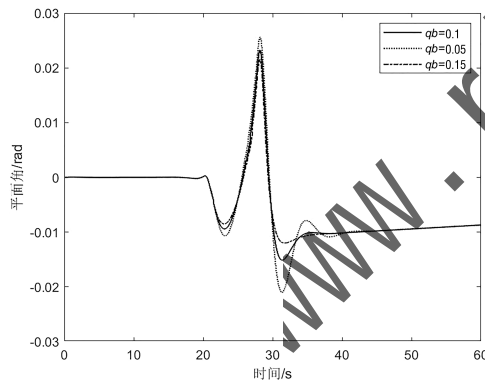
如图 5 所示,其中曲线变化为只改变横向偏差变化率期望参考系数大小时的仿真结果。



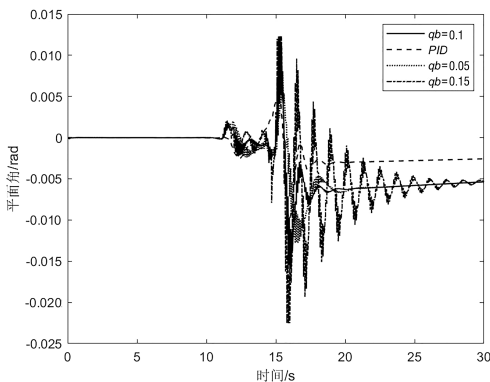
(a)车速为 10 m/s 时的前轮转角



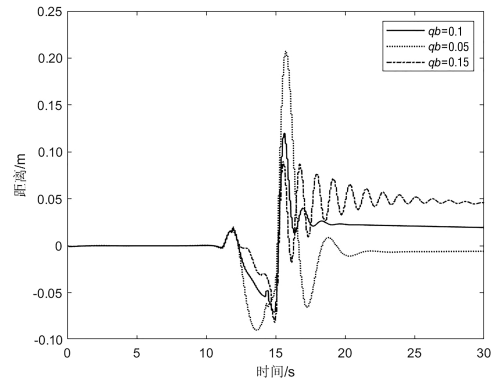
(b)车速为 10 m/s 时的横向偏差



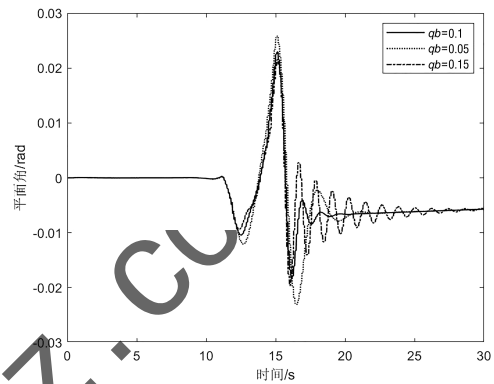
(c)车速为 10 m/s 时的航向角偏差



(d)车速为 20 m/s 时的前轮转角



(e)车速为 20 m/s 时的横向偏差



(f)车速为 20 m/s 时的航向角偏差

图 5 更改横向偏差变化率期望参考系数的结果对比

Fig.5 Results comparison of the expected reference coefficients for changing the change rate of lateral deviation

如图 5(a)所示的前轮转角结果图中,横向偏差变化率期望参考系数为 0.1 时为初始的默认值。更改横向偏差变化率期望参考系数为 0.05,可以看到图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)中曲线均出现了振荡现象且曲线也有一定的超调。更大的横向偏差变化率期望参考系数为 0.15,其表现要比横向偏差变化率期望参考系数变小时更加稳定,对整个车身的控制也更加稳定,但是处在弯道时会一直存在一定的车身横向偏移现象。

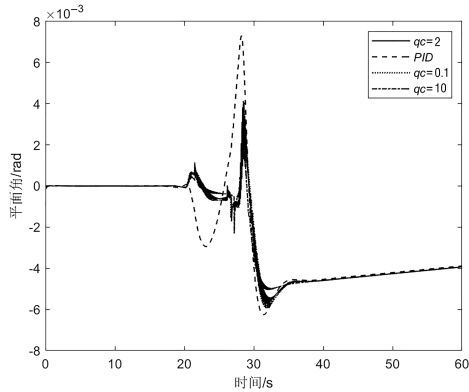
当把车辆的速度设置为 20 m/s 时,以同样的条件改变横向偏差变化率期望参考系数时,无论是增大还是减小,均会出现超调和振荡现象,所以在车辆高速行驶时,需要慎重调整此参数的大小。

如图 6 所示,其中曲线变化为只改变航向角偏差期望参考系数大小时的仿真结果。

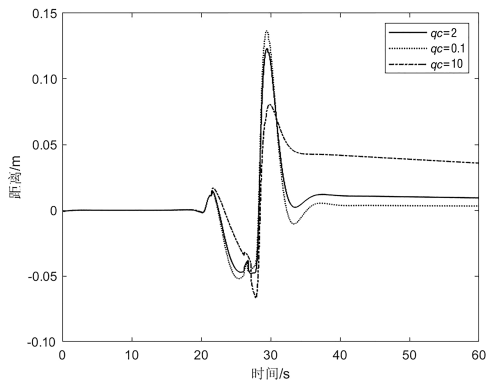
如图 6(a)所示的前轮转角结果图中,航向角偏差期望参考系数的值为 2 时为初始的默认值。无论增大还是减小此参数,其前轮转角和航向角的曲线相差无几,不同之处在于横向偏差。当将航向角偏差期望参考系数减小为 0.1 时,其横向偏差曲线的峰值会变大,但是其在弯道的偏差值最终将变为 0;当增大航向角偏差期望参考系数为 10 时,其横向偏差曲线的峰值会明显降低,但是其处在弯道行驶的车辆会有一定的横向偏移。

把车辆的速度设置为 20 m/s 时,以同样的条件改变航向角偏差期望参考系数。当航向角偏差期望参考系数增大为 10 时,除了横向偏差曲线的峰值会降低,还会看到曲线出现明显

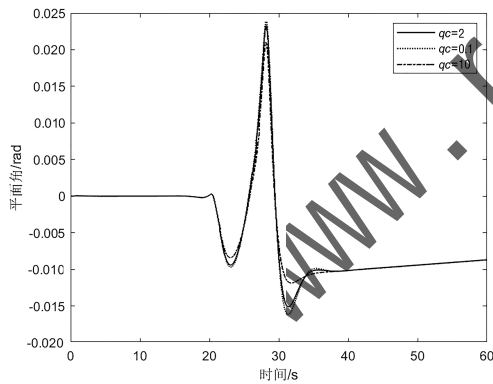
的振荡现象,如图 6(d)、图 6(e)和图 6(f)所示,此时意味着车辆行驶途中对车身的控制非常不稳定。当减小航向角偏差期望参考系数时,仿真曲线的表现与车速设置为 10 m/s 时一致。



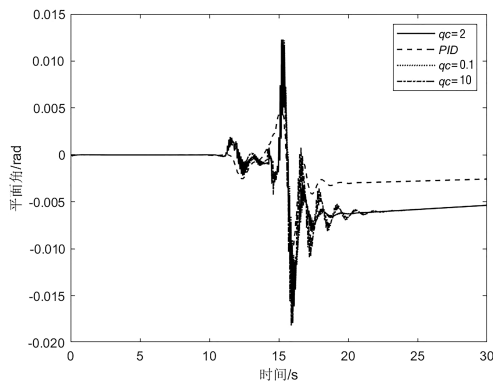
(a)车速为 10 m/s 时的前轮转角



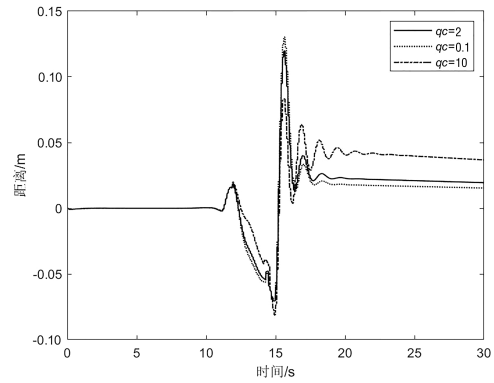
(b)车速为 10 m/s 时的横向偏差



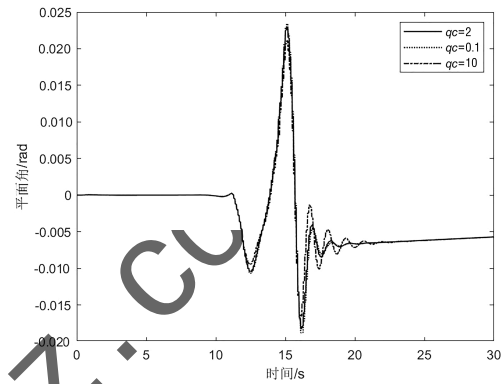
(c)车速为 10 m/s 时的航向角偏差



(d)车速为 20 m/s 时的前轮转角



(e)车速为 20 m/s 时的横向偏差

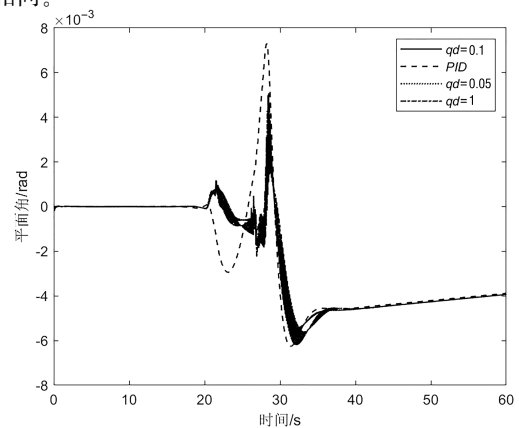


(f)车速为 20 m/s 时的航向角偏差

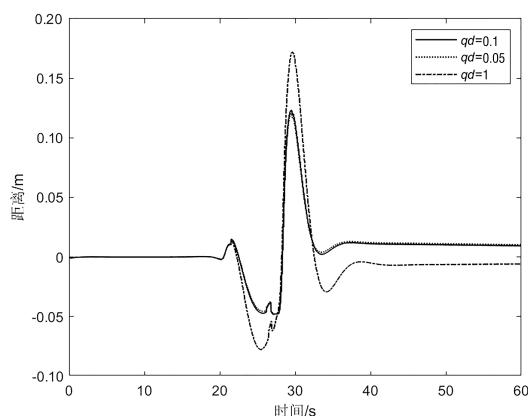
图 6 更改航向角偏差期望参考系数的结果对比

Fig. 6 Results comparison of the expected reference coefficients for changing heading angle deviation

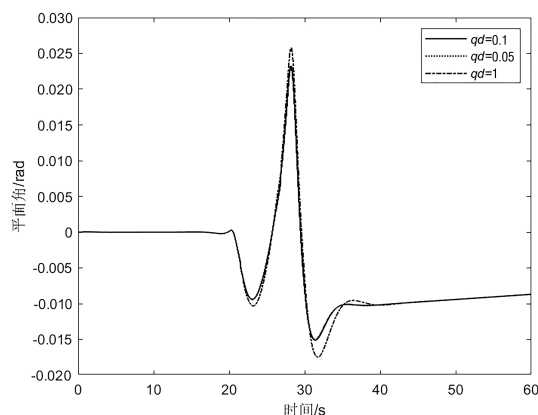
如图 7 所示,其中曲线的变化为只改变航向角偏差变化率期望参考系数大小时的仿真结果。当车速为 10 m/s 时,增大航向角偏差变化率期望参考系数,其对应的横向偏差和航向角偏差的峰值会变大;而减小航向角偏差变化率期望参考系数,其变化幅度不大。当车速为 20 m/s 时,增大航向角偏差变化率期望参考系数,其曲线会出现振荡现象,如图 7(d)、图 7(e)和图 7(f)所示,意味着车身控制不稳定;而减小航向角偏差变化率期望参考系数时,仿真曲线的表现与车速为 10 m/s 时的情况相同。



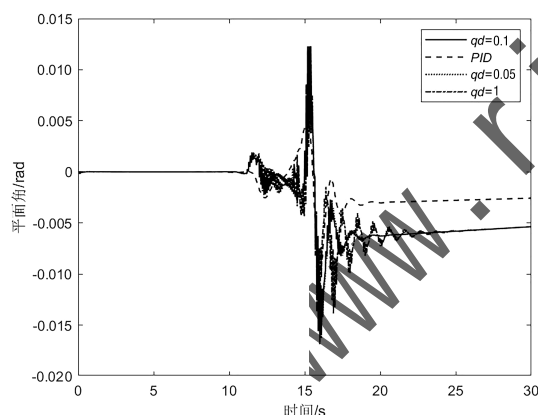
(a)车速为 10 m/s 时的前轮转角



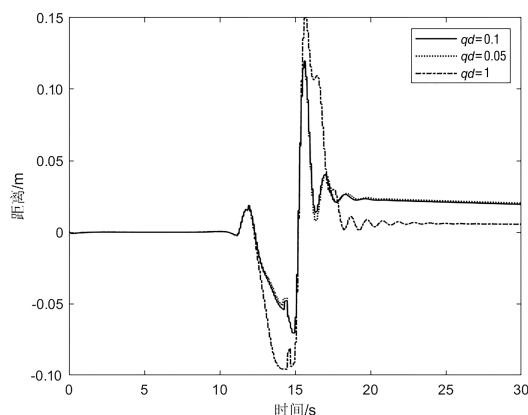
(b)车速为 10 m/s 时的横向偏差



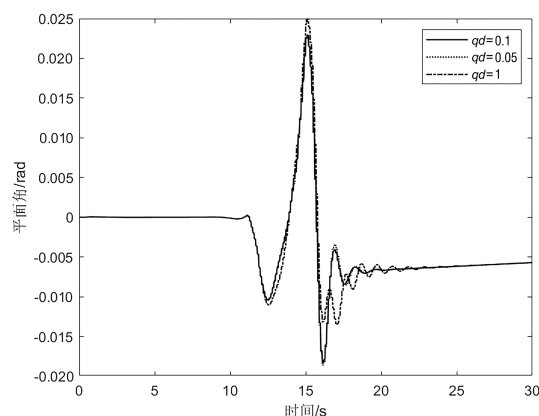
(c)车速为 10 m/s 时的航向角偏差



(d)车速为 20 m/s 时的前轮转角



(e)车速为 20 m/s 时的横向偏差



(f)车速为 20 m/s 时的航向角偏差

图7 更改航向角偏差变化率期望参考系数的结果对比

Fig. 7 Results comparison of the expected reference coefficients for changing the change rate of heading angle deviation

从图3、图4、图5、图6和图7可知,突变均发生在直线车道200 m处。分析其原因可知,是车道线的三次多项式拟合引起的。三次多项式在进行车道线拟合时,是对车辆摄像头和雷达可视范围内的整个车道线进行拟合,其拟合的系数受整个车道线的整体影响。当车辆在直线车道时,三次多项式拟合的车道线系数的三次项系数和二次项系数均趋近于0;一次项系数受汽车的航向角影响,只有当车辆前进方向和车道线平行时,值为0;在正常行驶的情况下,只有常数项不为0。当直线车道的末端为弯道时,车辆的摄像头和雷达检测到的车道线势必是一段直线段加一段圆弧线段组成的车道线,三次多项式对此进行拟合时,受圆弧车道线的影响,拟合出来的多项式系数势必与之前单纯的直线车道线不同,虽然此时车辆仍旧处于直线车道内,但是随着车辆越来越靠近弯道,拟合的4个系数与车辆在直线车道行驶时的拟合系数的差距越来越大,直到车辆完全进入弯道时才会逐渐恢复正常。

4 结论 (Conclusion)

本文通过建立车辆横向控制的闭环仿真模型,模拟了车辆在车道上开启定速巡航功能时的情景,通过改变相应参数探究其对车辆的影响。基于该模型软件,研究人员对车辆横向偏差期望参考系数、横向偏差变化率期望参考系数、航向角偏差期望参考系数、航向角偏差变化率期望参考系数和控制前轮转角约束系数进行研究。通过闭环仿真实验发现,减小控制前轮转角约束系数值,会增加车辆的横向偏差和航向角偏差,进而增大车辆失控的风险;当道路的曲率改变时,轻微调整横向偏差变化率期望参考系数,增大航向角偏差期望参考系数和航向角偏差变化率期望参考系数会引起车辆横向偏差和航向角偏差曲线的振荡。以上研究表明,前轮转角约束系数是车辆开启功能后能否安全行驶的关键,而其他4个参数则可以极大地改善车辆的性能,适当对其进行调整,可以增强车辆行驶时车身的稳定性。

参考文献 (References)

- [1] YANG W, LIU J J, ZHOU K X, et al. An automatic emergency braking model considering driver's intention

- recognition of the front vehicle[J]. Journal of Advanced Transportation,2020,2020:1-15.
- [2] FU Y C,LI C L,LUAN T H,et al. Graded warning for rear-end collision: an artificial intelligence-aided algorithm [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020,21(2):565-579.
- [3] BIAN Y G,DING J Y,HU M J,et al. An advanced lane-keeping assistance system with switchable assistance modes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2020,21(1):385-396.
- [4] DOOLEY D,MCGINLEY B,HUGHES C,et al. A blind-zone detection method using a rear-mounted fisheye camera with combination of vehicle detection methods [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016,17(1):264-278.
- [5] LIN Y C,NGUYEN H L T. Adaptive neuro-fuzzy predictor-based control for cooperative adaptive cruise control system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2020,21(3):1054-1063.
- [6] XIAO L Y,GAO F. A comprehensive review of the devel-

- opment of adaptive cruise control systems [J]. Vehicle System Dynamics,2010,48(10):1167-1192.
- [7] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. New York:Springer Science,2006:15-93.
- [8] 蔡志鑫,古永鹏,董浩,等. 基于 MPC 的无人驾驶汽车轨迹控制研究[J]. 汽车实用技术,2022,47(1):24-27.
- [9] 鲁雅阁,张志豪. 基于 MPC 的智能汽车自抗扰控制[J]. 内燃机与配件,2023(1):20-23.
- [10] 谷磊. 基于改进 MPC 算法的汽车稳定性控制研究[J]. 机械设计与制造工程,2022,51(9):59-64.
- [11] 石振新,冯剑波,王衍学. 基于 MPC 和模糊控制的智能汽车路径追踪研究[J]. 车辆与动力技术,2022(2):7-11.
- [12] WANG H Y,LIU B,PING X Y,et al. Path tracking control for autonomous vehicles based on an improved MPC[J]. IEEE Access,2019,7:161064-161073.

作者简介:

邢海涛(1997-),男,硕士生。研究领域:自动驾驶算法,汽车应用软件开发,声表面波的应用。

梁威(1985-),女,博士,副教授。研究领域:声表面波传感器与激发器的检测和控制。

(上接第 11 页)

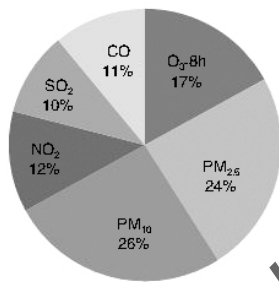


图 4 有效规则中大气污染物占比分布图

Fig. 4 Distribution chart of the proportion of air pollutants in effective rules

综合以上分析,污染物主要来源为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ,并且污染物之间确实具有一定的关联性。

4 结论(Conclusion)

本文基于 Apriori 算法,分析大气污染物之间的关联规则,设置并调整了模型的最小支持度以及最小置信度,得出了符合现实意义的关联规则集合,并获得了具有现实意义的污染物关联性结论,实验结论表明,模型得出的关联规则是正确的。通过该结论给今后的空气治理方法提出了新的理论依据,也为今后大气污染物及空气质量研究提供了新的思路。

参考文献(References)

- [1] 高云,郭艳萍,张叶娥,等. 基于 K-means 算法的空气质量分析的改进研究[J]. 新型工业化,2020,10(8):124-128.
- [2] 黄伟建,李丹阳,黄远. 面向空气质量的时空混合预测模型[J]. 计算机应用,2020,40(11):3385-3392.

- [3] LI H,XU X L,DAI D W,et al. Air pollution and temperature are associated with increased COVID-19 incidence: a time series study[J]. International Journal of Infectious Diseases,2020,97:278-282.

- [4] 张戈一,苟家满. 基于气象要素对于空气质量影响的探究[J]. 山西建筑,2020,46(15):148-149.
- [5] 张良均,王路,谭立云,等. Python 数据分析与挖掘实战[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [6] 郭阳泰. 基于数据挖掘的银行业务集中耗时分析[J]. 金融电子化,2020(10):95-96.
- [7] HUANG Z Y,LIN S, LONG L L, et al. Predicting the morbidity of chronic obstructive pulmonary disease based on multiple locally weighted linear regression model with K-means clustering[J]. International Journal of Medical Informatics,2020,139:104141.
- [8] BAI L,LIANG J Y,CAO F Y. A multiple k-means clustering ensemble algorithm to find nonlinearly separable clusters[J]. Information Fusion,2020,61:36-47.

作者简介:

郭艳萍(1976-),女,硕士,讲师。研究领域:人工智能,深度学习。

高云(1976-),女,硕士,讲师。研究领域:人工神经网络,深度学习。

景变(1979-),女,硕士,讲师。研究领域:计算机教育应用,网络安全,物联网。