

文章编号:1006-2467(2016)03-0401-06

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2016.03.014

基于主动转向的车辆路径跟随广义预测控制

曹 阳, 贺登博, 喻 凡, 罗 哲

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 为了增强车辆在外界干扰存下的路径跟随性能,提出了一种基于广义预测控制(GPC)的主动转向控制器来保证车辆对于路径的跟踪能力.采用受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)作为预测模型,通过带遗忘因子的最小二乘法辨识方法获得 CARIMA 模型参数,避免了由于车辆非线性造成的参数化建模不准确、繁琐问题.使用车辆路径侧向跟踪误差作为控制器输入,方向盘附加转角作为输出,与驾驶员方向盘转角进行综合,获得车辆方向盘最终转角.在 Simulink-CarSim 联合仿真环境下,验证了所设计控制器在双移线工况有强侧向风干扰时车辆对路径的跟随性能.

关键词: 主动转向; 车道保持; 路径跟随; 广义预测控制

中图分类号: U 46

文献标志码: A

Generalized Predictive Control Based on Vehicle Path Following Strategy by Using Active Steering System

CAO Yang, HE Dengbo, YU Fan, LUO Zhe

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to improve the lane tracking capability of vehicles under disturbances, an active steering system based on generalized predictive controller was proposed, of which a controlled auto-regressive integrated moving-average model (CARIMA) was used as the inner model. Considering the complexity and uncertainty of vehicle parametric modeling process, a recursive least square method was applied to estimate the parameters in the CARIMA model. The controller used the deviation between the vehicle lateral position and desired lateral position as the input and steering wheel angle as the output. Based on driver steering wheel input, the final corrected steering wheel angle was obtained. The performances of the controller were examined in the Simulink-CarSim environment under strong lateral wind condition in standard double-lane-change operating experiment.

Key words: active steering; lane keeping; path following; generalized predictive control

车辆主动转向系统可以通过独立于驾驶员方向盘转角的转向输入,对车辆转向进行干预,以提升车

辆在高速和低速情况下的操控性能及侧向稳定性^[1].按照主动转向干预驾驶员操纵的方式,可分为

收稿日期:2015-03-24

基金项目:国家自然科学基金(51375299),机械系统与振动国家重点实验室课题(MSV201505)资助项目

作者简介:曹 阳(1986-),男,江苏省淮安市人,博士生,研究方向:汽车系统动力学及控制. E-mail: caoyang0929@126.com.

罗哲(联系人),男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34207414;E-mail: luozhe@sjtu.edu.cn.

机械式(即通过行星齿轮机构对前轮转角进行干预)以及电子式(即通过综合驾驶员转角输入和车辆状况来决定转向电动机的输出角度^[2]).实际驾驶中,驾驶员可以通过操纵方向盘使车辆与预定路径的行驶轨迹偏差保持在允许范围之内.然而,由于受到外界干扰,如侧向风等或者由于驾驶员本身的因素,车辆可能会偏离预定路线,因此,有必要研究相关的驾驶辅助系统在一定条件下对驾驶行为进行干预,以保证车辆对预定路径的跟踪能力.

在车辆侧向控制方面,最为典型和广泛使用的是车辆电子稳定系统(Electronic Stability Program, ESP)^[3],其通过精确分配施加在4个车轮的制动力及驱动力,纠正车辆的过度转向或者不足转向趋势,从而保持车辆的稳定性.但是,ESP系统本身不具有对路径的主动跟踪能力,即无法保证车辆对行驶路径的跟踪.针对驾驶员路径跟踪行为,Guo等^[4]提出了基于预瞄的神经网络模型,通过训练方法获得神经网络的权重参数,对驾驶员进行了建模.Cao等^[5]在神经网络模型的基础上,提出了考虑促变动力学的神经网络模型,并且对神经网络模型的参数进行了理论估计和试验研究.而针对车辆路径跟踪,主要集中在智能车辆的研究上,如杨君等^[6]提出了基于模糊神经网络的角速度控制器设计方案.Raffo等^[7]针对无人驾驶车辆,设计了包含运动控制和动力学控制的预测控制器进行路径跟踪.Wit等^[8]提出了一种“向量跟踪”的方法,它是基于车辆当前位置和车辆下一路径点的方向及该点的切线方向来决定车辆的转向半径.但是,以上的路径跟踪控制器都是针对无人驾驶车辆或无人机器人,没有与主动转向等辅助驾驶系统相结合.Wang等^[9]基于滑模控制器以及直流电动机,设计了线控转向系统,并且考虑了系统的动态不确定性,对系统的鲁棒性进行了验证.Tjionnas等^[10]设计了主动转向系统与自适应制动控制综合的稳定性控制器.但是,以上主动转向系统的研究目的主要针对车辆的稳定性控制或者线控转向系统对机械转向系统的替代,在路径跟踪方面研究较少.而现有的路径保持系统控制器内模型大多基于驾驶员模型^[11],其控制效果受限于驾驶员模型的选择.

本文基于广义预测控制方法,设计和验证了车辆主动转向系统,以实现车辆对路径的跟随和车道的保持.通过辨识得到了受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)模型的基本参数,并以之作为广义预测控制(Generalized predictive control, GPC)的预测模型.控制器以路径中心线作为跟踪目标,进行

多点预瞄,以车辆与路径中心线的侧向位移偏差作为反馈量,附加方向盘转角作为输出,通过加权叠加的方法,补偿驾驶员施加的方向盘转角,从而实现车辆对预定路线的跟踪.

1 目标路径处理

1.1 目标路径选取和前处理

为了进行主动转向控制,首先需要确定目标路径.本文所提出的主动转向控制器,其目的是为了辅助驾驶员进行路径跟随,尤其是在车辆受到大的外界干扰或者驾驶员由于走神或者其他意外情况引起车辆偏离车道的状况.关于车道识别,已经做了大量的研究工作,如李进等^[12]通过图像识别方法对车道进行了辨识,Yenikaya等^[13]对现有的车道辨识技术进行了总结,提出和分析了其中存在的主要技术难点,同时也罗列了部分基于其他特殊道路的车道辨识方法.本文将选取车道中心线作为目标路径.

由于目标路径是在二维空间中描述的,采用横、纵坐标描述需要处理2个坐标值,不方便控制器对目标路径进行计算.因此本文采用将二维编码转换为一维编码的方法^[14].如图1所示,在预瞄范围之内,选取车辆当前点和目标路径终点所在直线作为 x 轴,得到 Oxy 坐标系,并将 x 轴等距分为 n 份,则路径可以用一组 x 坐标对应的 y 坐标值来描述.由此,关于路径的二维编码 (x_0, y_0) 即可以转换为坐标 y 的一维数组 $(y_1, y_2, \dots, y_{n-1})$.

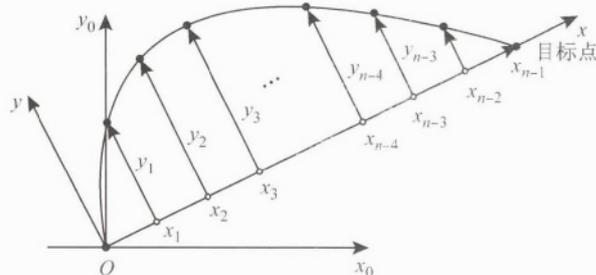


图1 目标路径一维编码描述

Fig. 1 Description of one dimensional code on target path

1.2 路径的空间描述和时间描述转换

在广义预测控制中,预测时域是和时时间相关的,因此,需要在当前 t 时刻计算 $t+T$ 时刻的目标侧向位移,其中 T 为预测步长,即在已知当前时刻侧向位移 y_t 的情况下,计算 $t+T$ 时刻侧向位移 y_{t+T} .由于目标路径是按照空间给出的,即 $y=f(x)$,因此,需要将其转换成 $y=g(x)$ 的时间描述方式.如图2所示,在 Oxy 坐标系下, x_t 为当前时刻 x 坐标, y_t

为其对应侧向位移,则 $t+T$ 时刻的坐标可由下式得到:

$$x_{t+T} = vT \cos \alpha_t \quad (1)$$

式中: v 为车辆速度; α_t 为当前时刻参考路径在 Oxy 坐标系下的方向角,定义为

$$\alpha_t = \arctan \frac{y_{next} - y_t}{x_{next} - x_t} \quad (2)$$

x_{next}, y_{next} 为下一路径参考点的横、纵坐标值。

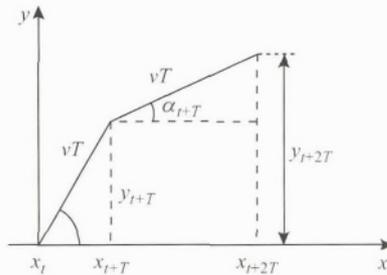


图 2 预测时域内参考路径估算

Fig. 2 Calculation of reference path in prediction horizon

将式(1)所获得的 $t+T$ 时刻纵向坐标值 x_{t+T} 代入参考路径,通过查表可以得到对应时刻的侧向位移 y_{t+T} . 重复以上步骤,可以得到预测时域内目标侧向位移。

2 CARIMA 模型及其辨识

2.1 模型介绍

本文采用 CARIMA 模型作为广义预测控制的预测模型^[15],一般情况下,具有辨识效果好,对未建模动态具有较好的鲁棒性等优点,其形式为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (3)$$

式中: k 为采样控制的离散时间点; z^{-1} 为后移算子; $A(z^{-1}), B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 分别为 n, m 和 n 阶 z^{-1} 的多项式, n, m 为多项式的阶次; $\Delta = 1 - z^{-1}$ 为差分算子; $y(k), u(k)$ 和 $\xi(k)$ 分别为输出、输入和均值为零的白噪声序列. 本文不考虑白噪声项。

由于本文中用到的 GPC 控制器以车辆的侧向位移为输入量,因此,需要就车辆方向盘转角输入与车辆侧向位移 CARIMA 模型进行辨识. 另外,值得注意的是,本文所辨识得到的 CARIMA 模型是针对某一车速的,因此,如果需要在另一车速下进行广义预测控制,并在相应速度下重新对模型进行辨识. 当然,由于结合在线辨识和自校正机制后, CARIMA 模型具有较强的鲁棒性,因此,实际使用时,可以针对一系列离散车速进行模型辨识,并采取一定的切换机制,以满足不同连续车速下广义预测控制

的需求。

2.2 带遗忘因子的递推最小二乘法

本文选取 CarSim 中某 C 级车,在车速 $v=50$ km/h 条件下,给车辆输入一定的随机方向盘转角激励,采集车辆侧向位移的信息. 使用带遗忘因子的递推最小二乘法,以得到相应的 CARIMA 模型参数:

$$\hat{w}(\tau) = \hat{w}(\tau-1) + K(\tau)[z(\tau) - h^T(\tau)\hat{w}(\tau-1)] \quad (4)$$

$$K(\tau) = P(\tau-1)h(\tau)[h^T(\tau)P(\tau-1)h(\tau) + \xi]^{-1} \quad (5)$$

$$P(\tau) = \frac{1}{\xi}[I - K(\tau)h^T]P(\tau-1) \quad (6)$$

式中: τ 为递推次数; $0 \leq \xi \leq 1$,为遗忘因子,本文取 $\xi = 0.972$; $\hat{w}(\tau)$ 为辨识结果,其初值 $\hat{w}(0)$ 可任意选取,不影响辨识结果; $P(0)$ 为 $l+s+1$ 阶对角矩阵,对角元素可初始化为任意值; $K(\tau)$ 为行向量, $K(0)$ 初始化为 $l+s+1$ 维行向量,可任意取值;

$$h^T(\tau) = [-y(\tau-1) \quad -y(\tau-2) \quad \dots \quad -y(\tau-l) \quad u(\tau) \quad u(\tau-1) \quad \dots \quad u(\tau-s)]$$

由车辆操纵动力学方程可知,对于方向盘转角侧向位移模型, $l=s=4$, 辨识结果如图 3 所示. 可见, A 的多项式系数 $a_i (i=0, 1, 2, 3, 4)$ 辨识结果在迭代计算约 1 000 次趋于稳定。

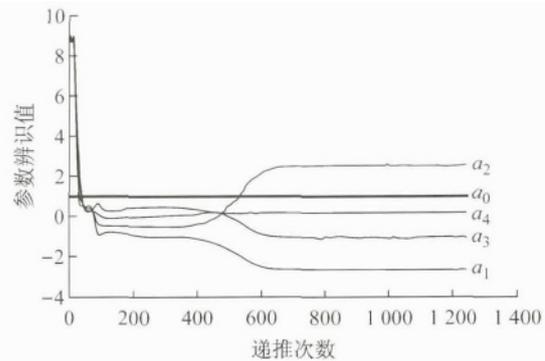


图 3 递推最小二乘法的参数辨识

Fig. 3 Parameter identification of recursive least squares method

由图 3 可见,经过一定迭代计算后,侧向位移模型辨识参数能够收敛到一定值. 为验证辨识结果,对所辨识模型输入 $\omega=1$ rad/s 正弦信号,如图 4 所示. 图中, θ 为方向盘转角。

同时,对比相同输入下两者的侧向位移 S ,结果如图 5 所示. 可见所辨识的 CARIMA 模型的精度能够满足要求。

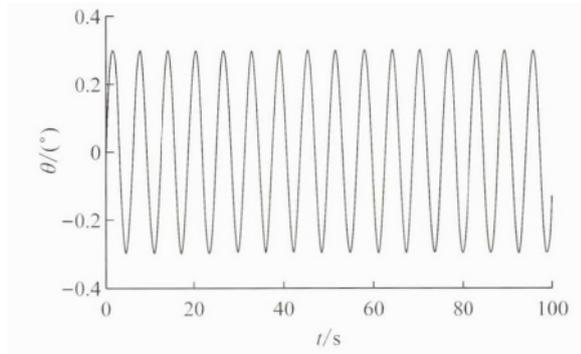


图 4 方向盘转角输入信号

Fig. 4 Input signal of steering wheel

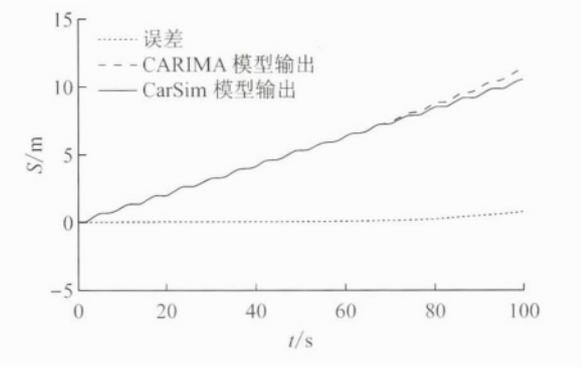


图 5 辨识模型输出与 CarSim 模型输出及其偏差

Fig. 5 Deviation on output of identification and carsim model

3 广义预测控制器设计

3.1 控制器结构

控制器结构如图 6 所示. 为了便于仿真计算, 本文选取神经网络驾驶员模型模拟驾驶员^[4], 将 GPC 控制器输入与神经网络驾驶员模型方向盘转角输出进行加权综合, 以获得车辆方向盘的最终转角. 其中前处理模块将空间目标路径转换为时间相关的目标量. 车辆模型的输入为方向盘转角. 由文献[5]中的计算分析及实际调试, 可以得到神经网络优化驾驶

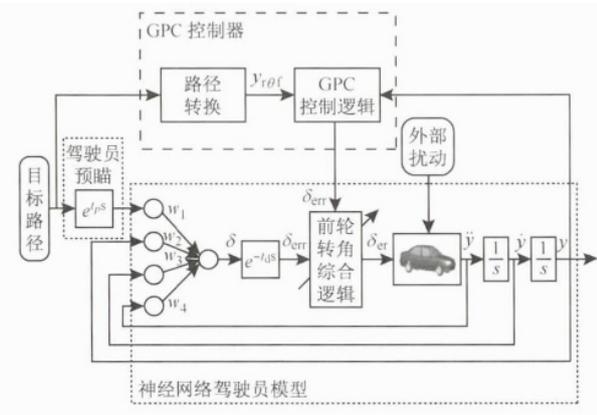


图 6 主动转向控制器框图

Fig. 6 Block diagram of active steering controller

员模型的参数. 其中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为驾驶员预瞄路径的侧向位置权重、车辆路径实际侧向位移的权重、车辆实际侧向速度的权重以及车辆实际侧向加速度的权重; t_p 为驾驶员预瞄时间, 与车速 v_x 及路径曲率 ρ 相关; t_d 为驾驶员反应时间; y_{ref} 为参考跟踪路径; δ_{dsw} 和 δ_{gsw} 分别为驾驶员和 GPC 控制器输入方向盘转角; y, \dot{y}, \ddot{y} 分别车辆的侧向位移、位移的一阶导数和二阶导数.

3.2 GPC 控制器设计

对于单输入多输出广义预测控制, 设其目标函数为

$$J = (Y - W)^T (Y - W) + \lambda \Delta U^T \Delta U \quad (7)$$

式中:

$$Y = [y(k+1) \quad y(k+2) \quad \cdots \quad y(k+n)]^T$$

为未来 n 步内车辆侧向位移序列; λ 为输入的加权系数;

$$\Delta U = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+n-1)]^T$$

为控制输入序列;

$$W = [w(k+1) \quad w(k+2) \quad \cdots \quad w(k+n)]^T$$

为未来 n 步长内柔化的目标路径侧向位移序列;

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1 - \alpha^j) y_r \quad (8)$$

α 为柔化系数, $0 \leq \alpha < 1$, y_r 为目标路径参考侧向位移. 柔化的目的在于防止过于剧烈的控制增量.

为了由 CARIMA 模型获取对未来的测量, 首先引入 Diophantine 方程:

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-1}F_j(z^{-1}) \quad (9)$$

式中:

$$E_j(z^{-1}) = 1 + e_{j1}z^{-1} + \cdots + e_{j,j-1}z^{-j+1}$$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j0} + f_{j1}z^{-1} + \cdots + f_{jn}z^{-n}$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

将式(8)两边同时左乘 $E_j(z^{-1})\Delta$ 后, 结合式(9)可以得到 k 时刻对于 j 步后车辆侧向位移输出的预测为

$$\hat{y}(k+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1) + F_j(z^{-1})y(k) \quad (10)$$

式中,

$$G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})\Delta} [1 - z^{-j}F(z^{-1})] \quad (11)$$

式(10)包含 k 时刻已知量和未知量两部分, 其中已知量可以表示为

$$f = H\Delta u(k) + Fy(k) \quad (12)$$

式中:

$$H = \begin{pmatrix} G_1 - g_0 \\ z(G_2 - z^{-1}g_1 - g_0) \\ \vdots \\ z^{n-1}(G_n - z^{-n+1}g_{n-1} - \dots - z^{-1}g_1 - g_0) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$G = \begin{pmatrix} g_0 & & & 0 \\ g_1 & g_0 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ g_{n-1} & g_{n-2} & \dots & g_0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$F = [F_1 \quad F_2 \quad \dots \quad F_n]^T \quad (15)$$

则由式(10),可得最优输出预测为

$$\hat{Y} = G\Delta U + f \quad (16)$$

式中:

$$\hat{Y} = [\hat{y}(k+1) \quad \hat{y}(k+2) \quad \dots \quad \hat{y}(k+n)]^T$$

$$\Delta U = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+n-1)]^T$$

将 \hat{Y} 作为未来 n 步内车辆侧向位移代入式(12),并令:

$$\partial J / \partial \Delta U = 0 \quad (17)$$

可得:

$$\Delta U = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (W - f) \quad (18)$$

在实际控制中,由于滚动优化,每次只输出第一个控制分量:

$$u(k) = u(k-1) + g^T (W - f) \quad (19)$$

式中, g^T 为 $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$ 的第一行. 控制器参数为:预测步数 $n=15$,控制步数 $m=15$,控制器步长 $T=0.08$ s,输入增量权重 $\lambda=6$,柔化系数 $\alpha=0.1$.

4 仿真及结果分析

设计的控制器在 Matlab-CarSim 联合仿真环境下进行测试,所选车辆为某 C-Class 车,与 CARIMA 模型辨识车辆相同,车速 $v=50$ km/h. 为了验证控制器的性能,选取典型双移线路线进行试验.

在无侧向风和施加强侧向风情况下,对比使用了本文所设计控制器的车辆和无控制器车辆的方向盘转角输入及行车路线. 由文献[16]可知,对于行车影响较大的风速区间为 $v_w \in [10, 25]$ m/s, 本文选取风速为 25 m/s,方向为垂直于车辆左侧的阵风及车速为 50 km/h 的情况进行仿真试验. 试验基本参数及车辆参数为路面附着系数 $\mu=0.85$,车辆整备质量 $m=1\,274$ kg,轴距 $L=2.578$,前轮到质心距离 $L_f=1.016$ m,轮距 $b=1.739$ m. 仿真结果分别如图 7、8 所示. 可见,在强侧向风情况下,主动转向控制下的车辆可以在大范围内更好地贴合路径中心线,且在双移线操作之后,稳定时间更短,超调也更小;

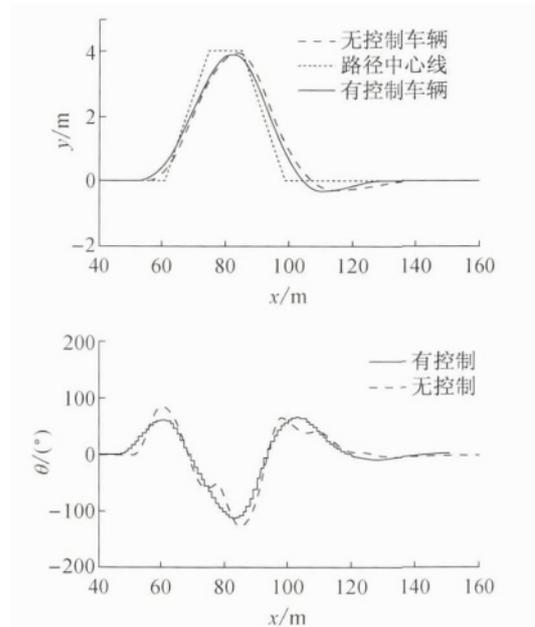


图 7 无侧向风下有/无控制器仿真结果

Fig. 7 Simulation result comparison of with/without lateral force controller in case of no crosswind

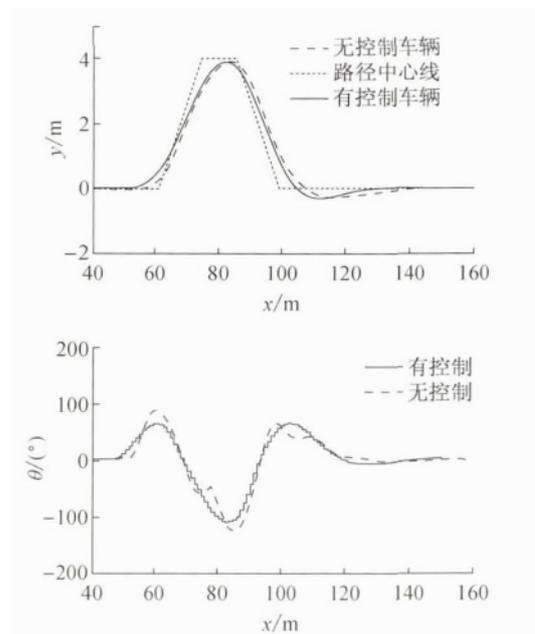


图 8 强侧向风下有/无控制器仿真结果

Fig. 8 Simulation results comparison of with/without lateral force controller in case of strong crosswind

同时,车辆的最大方向盘转角更小,且曲线较为平滑,意味着车辆行驶状态更加稳定. 此外,对比图 7、8 可见,在强侧向风情况下,主动转向控制的车辆轨迹较为稳定,受外界干扰较小.

为了检验 GPC 控制器在一定范围内的鲁棒性,将车速以及整车质量分别进行 10% 的偏移,在相同的侧向风情况下进行仿真试验.

由图 9 见,在整车质量发生 10% 偏移时,控制器

依然可以较好地辅助车辆跟随路径中心线;而在车速发生10%偏移时,跟踪误差虽然比车辆质量发生偏移时大,但是依然可以大致跟踪路径中心线.由此可见,GPC主动转向控制器具有一定的抗干扰性.

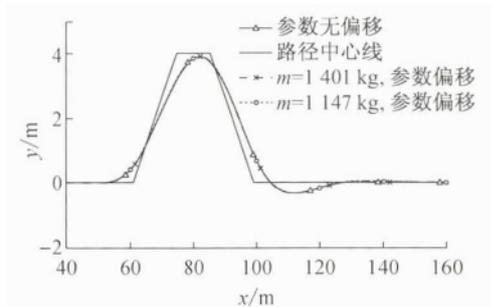


图9 模型参数偏移时车辆行驶轨迹

Fig.9 Vehicle trajectory under offset parameters condition

5 结 语

由仿真结果分析可知,所设计的控制器可以在强侧向风等外界干扰情况下,跟踪路径中心线,实现车道保持的功能.同时,控制器具有一定的鲁棒性,可以在车辆参数发生偏移时依然保持较好的控制效果.今后,将考虑研究基于不同车速下CARIMA模型的主动转向车道保持控制器及其不同速度间的切换问题,以减少车辆车速与辨识模型不一致时的控制误差,扩展控制器的使用范围.

参考文献:

- [1] ZHAO W Z, LIN Y, WEI J W, *et al.* Control strategy of a novel electric power steering system integrated with active front steering function[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(6): 1515-1520.
- [2] 高晓杰, 余卓平, 张立军, 等. 机械式前轮主动转向系统的原理与应用[J]. *汽车工程*, 2006, 28(10): 918-921.
GAO Xiaojie, YU Zuoping, Zhang Lijun, *et al.* The principle and application of mechanical active front steering system [J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28(10): 918-921.
- [3] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control. second edition[M]. USA: Springer, 2012: 201-240.
- [4] GUO K, CHENG Y, DING H. Driver model based on the preview optimal artificial neural network[C]// *Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control. (AVEC '02)*. Hiroshima, Japan: AVEC, 2002: 677-682.
- [5] LI B, YU F. Desing of a vehicle lateral stability control system via a fuzzy logic control approach[J].

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part D. *Journal of Automobile Engineering*, 2010, 224(3): 313-326.
- [6] 杨君, 马戎, 刘婷, 等. 基于模糊神经网络的智能车辆路径跟踪[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(7): 367-360.
YANG Jun, MA Rong, LIU Ting, *et al.* Path tracking of intelligent vehicle based on fuzzy neural network[J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(7): 367-360.
- [7] RAFFO G V, GOMES G K, NORMEY-Rico J E, *et al.* A predictive controller for autonomous vehicle path tracking[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(1): 92-102.
- [8] WIT J, CRANE C D, ARMSTRONG D. Autonomous ground vehicle path tracking[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2004, 21(8): 439-449.
- [9] WANG H, KONG H, MAN Z, *et al.* Sliding mode control for steer-by-wire systems with AC motors in road vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1596-1611.
- [10] TJONNAS J, JOHANSEN T A. Stabilization of automotive vehicles using active steering and adaptive brake control allocation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(3): 545-558.
- [11] 张海林. 基于电动转向的车道保持系统[D]. 北京: 清华大学机械工程学院, 2012.
- [12] 李进, 陈杰平, 易克传, 等. 不同光照下基于自适应图像阈值的车道保持系统设计[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 146-152.
LI Jin, CHEN Jieping, YI Kechuan, *et al.* Lane tracking system based on adaptive image threshold under different illumination[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 146-152.
- [13] YENIKAYA S, YENIKAYA G, DÜVEN E. Keeping the vehicle on the road: A survey on on-road lane detection systems [J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2013, 46(1): 2-2.
- [14] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清. 基于遗传算法的移动机器人动态避障路径规划方法[J]. *模式识别与人工智能*, 2002, 15(2): 161-166.
LI Qinzong, KANG Weikang, YE Xieqin. Robot dynamic obstacles avoiding planning method based on genetic algorithm[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, 15(2): 161-166.
- [15] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control—Part I. The basic algorithm [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137-148.
- [16] 彭佳. 高速公路典型地形环境风下的行车安全研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2010.