

基于自抗扰技术的汽车侧风稳定性研究

白玉¹, 桑楠^{1,2}

(1. 常州工学院 机电工程学院, 江苏 常州 213002; 2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 随机侧向风影响汽车操纵稳定性, 增加驾驶操作难度. 针对侧向风干扰, 在线性二自由度模型的基础上提出基于自抗扰技术的汽车主动前轮控制器, 消除侧向风干扰对汽车行驶的影响. 在 Matlab 软件中建立了人-车-路闭环仿真模型, 用以控制 CarSim 四轮车辆模型进行双移线道路仿真试验. CarSim 与 Simulink 联合仿真结果表明: 在侧向风干扰下, 自抗扰控制器能很好控制车辆模型完成双移线道路仿真试验, 且响应的各项性能指标均优于无风情况; 同时, 控制器对车速适应性好, 对模型精度要求不高, 鲁棒性强. 主动前轮控制器能有效抗侧向风干扰, 改善汽车的操纵稳定性和行驶安全性.

关键词: 自抗扰技术; 侧向风; 稳定性; 主动前轮转向

中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2014)04-0028-06

Study of vehicle crosswind stability based on ADRC technology

BAI Yu¹, SANG Nan^{1,2}

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Random crosswind affects vehicle handling and stability, increasing the difficulty of driving operation. For crosswind disturbance, active front steering controller based on ADRC (Active Disturbance Rejection Control) technology was proposed base linear two degrees of freedom model, to eliminate crosswind disturbance on motor cars. Closed-loop simulation model of driver-vehicle-road was established in Matlab controls CarSim four vehicle model, and double lane change road simulation test. CarSim and Simulink co-simulation results show: under crosswind disturbance, the ADRC controller can well control the vehicle model to complete the double lane change road simulation test, and the performances of response are better than no wind situation; meanwhile, controller is well to speed adaptability, the model less precision and robustness. AFS (active front steering) controller is effective to resist crosswind disturbance, improve handling and stability and driving safety.

Key words: active disturbance rejection technique; crosswind; stability; active front steering

跨海大桥上行驶的汽车、高速交会的汽车等都会受到强侧向风的干扰, 使汽车操纵稳定性变差, 尤其对于高速行驶的汽车甚至有可能引发严重的交通事故. 高速行驶汽车抗侧向风干扰问题的主动控制是汽车操纵稳定性研究中的重要内容, 国内外众多学者对此进行了研究. 文献[1]提出基于模糊控制附加横摆力矩的方法来提高车辆直线行驶稳

定性; 文献[2]提出主动侧倾力矩控制方法提高车辆在侧向风干扰下的侧倾稳定性; 文献[3]采用前馈和反馈对侧向风等侧向扰动进行补偿, 提高汽车抗干扰的能力和操纵的舒适性; 文献[4]研究表明, 减小总升力、侧向力和横摆力矩能改善车辆侧风稳定性; 文献[5-6]提出通过辅助空气悬架主动控制策略提高铁路车辆在侧向风干扰下的操纵

稳定性和安全性;谷正气等^[7]提出基于BP神经网络的模型参考自适应控制方法设计了主动四轮转向控制系统,减小侧向风对高速行驶汽车运动状态的影响;丁能根等^[8]采用线性二次型最优控制算法设计主动前轮转向控制器,提高车辆的操纵稳定性;赵景波等^[9]提出柔性PID控制策略,避免汽车过度偏驶从而提高汽车操纵稳定性。

随机侧向风产生侧向力和横摆力矩,改变了汽车的侧向受力情况,使汽车偏离预期路径,在行驶中驾驶员需不断予以纠正,增加了驾驶员负担,使得驾驶员易疲劳.因此,采取主动措施改变汽车侧向受力,减弱或消除侧向风的干扰是抗侧向风干扰常用的方法。

汽车主动前轮转向系统(AFS, active front steering)在紧急状况下或受外界干扰时,主动对前轮施加附加转角实现改变车辆横向受力,从而改善车辆的操纵特性^[10].本文采用自抗扰技术^[11]设计主动前轮转向系统控制器,提高汽车在侧向风干扰下的操纵稳定性.相对于前述文献方法,自抗扰技术根据系统的输入输出,采用非线性反馈对扰动进行动态估计与补偿,对动力学模型精度要求不高,解耦不需进行复杂运算,非线性反馈使控制器实时性好。

1 考虑侧向风的二自由度车辆模型

侧向风产生的侧向力和横摆力矩对汽车操纵稳定性产生影响,考虑侧向风的二自由度车辆模型如图1所示(图中坐标系原点与汽车质心重合),考虑前轮转角较小,纵向(x 轴方向)车速 u_x 不变,则其线性化动力学方程如下^[12]:

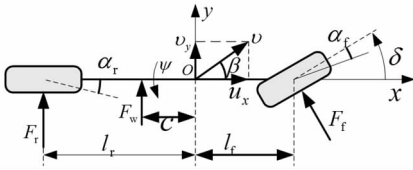


图1 二自由度车辆模型

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = \frac{l_f^2 k_1 + l_r^2 k_2}{I_z u_x} \dot{\psi} + \frac{l_f k_1 - l_r k_2}{I_z} \beta + \frac{M_w}{I_z} - \frac{l_f k_1}{I_z} \delta; \\ \ddot{\beta} = \left(\frac{l_f k_1 - l_r k_2}{m u_x^2} - 1 \right) \dot{\beta} + \frac{k_1 + k_2}{m u_x} \beta + \frac{F_w}{m u_x} - \frac{k_1}{m u_x} \delta. \end{cases} \quad (1)$$

式中, m 为汽车质量,kg; I_z 为绕 z 轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; k_1, k_2 分别为前后轮侧偏刚度, N/rad ; l_f, l_r 分别为前后轴到汽车质心的距离,m; $\dot{\psi}$ 为横摆角速度, rad/s ; β 为质心侧偏角, rad ; F_w 为侧向风产生的侧向力,N; M_w 为侧向风产生的附加横摆力

矩, $\text{N} \cdot \text{m}$.对于具有AFS系统的汽车,其前轮转角 $\delta = \delta_f + \delta_a$, δ_f 为方向盘产生的前轮转角, rad ; δ_a 为控制器输出的前轮附加转角, rad 。

对式(1)两边求导,把质心侧偏角 $\beta = v/u_x$, $\dot{\beta} = \dot{v}_y/u_x$, $a_y = \dot{v}_y + u_x \dot{\psi}$ 带入整理得:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w) + b_1 \delta; \\ \dot{a}_y = f_2(\psi, \dot{\psi}, a_y, F_w) + b_2 \delta. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w) = \frac{l_f^2 k_1 + l_r^2 k_2}{I_z u_x} \dot{\psi} - \frac{l_f k_1 - l_r k_2}{I_z} \dot{\psi} + \frac{l_f k_1 - l_r k_2}{I_z u_x} a_y + \frac{M_w}{I_z}$;

$$f_2(\psi, \dot{\psi}, a_y, F_w) = \frac{l_f k_1 - l_r k_2}{m u_x} \dot{\psi} - \frac{k_1 + k_2}{m} \dot{\psi} + \frac{k_1 + k_2}{m} a_y + \frac{F_w}{m}$$
;

$$b_1 = -l_f k_1 / I_z; b_2 = -k_1 / m; \delta = \delta_f + \delta_a.$$

δ_f 根据方向盘的输入由微分器得到,为已知输入; δ_a 为控制输入前轮附加转角角速度.因此,AFS需输出变量 $\delta_a, \dot{\delta}_a$ 。

汽车方向盘转角 δ_{sw} 由单点预瞄模型给出^[13-14].驾驶员在驾驶车辆过程中会根据车辆状态、道路情况不断修正行驶方向,使得人-车-路构成一个闭环系统.在考虑了汽车的动态响应特性与驾驶员的反应滞后,得到人-车-路闭环系统驾驶员模型,如图2所示。

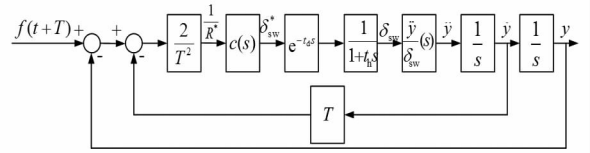


图2 单点预瞄驾驶员模型

$$\delta_{sw} = \frac{1}{1 + t_h s} e^{-t_d s} c(s) \frac{2}{T^2} (f(t + T) - y - T\dot{y}). \quad (3)$$

式中, T 为驾驶员前视时间,s. $c(s) = c_0(1 + T_c s)$ 为校正环节, $c_0 = u_x^2 / G_{ay}$, G_{ay} 侧向加速度稳态增益, $\text{N} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{rad}^{-1}$.对于熟练驾驶员^[13-14]: $T = 0.8 \text{ s}$, $T_c = 0.4068 \text{ s}$, $t_d = 0.3 \text{ s}$, $t_h = 0.1 \text{ s}$.该模型在实际使用中,侧向速度和侧向位移由实车或车辆仿真模型给出。

本文采用随机阵风作为侧向风干扰输入作用于车辆模型,形式如图3所示。

2 自抗扰控制器设计

2.1 参考模型

主动控制侧向风干扰的目的是使汽车在侧向风干扰下汽车的运行状态不发生突变,驾驶员不至

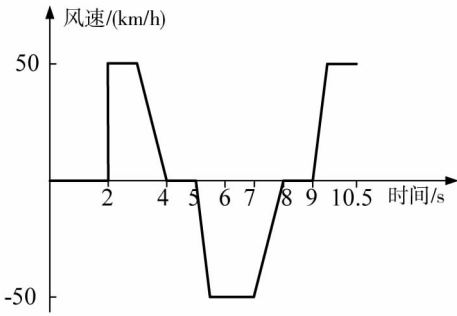


图3 随机侧向阵风

于因为干扰而进行错误操作,设计 AFS 控制器控制车辆的响应在随机干扰的情况下仍然跟随线性二自由度车辆(无干扰)的稳态响应,那么,车辆在强侧向风干扰下也能像在线性区一样容易操纵^[4].考虑汽车行驶的路面附着条件,在方向盘角输入下汽车的理想横摆角速度响应 $\dot{\psi}_d$ (参考模型):

$$\dot{\psi}_d = \frac{u_x/L}{(1 + Ku_x^2)G} \delta_{sw}, (|\dot{\psi}_d| \leq \mu g/u_x). \quad (4)$$

式中, K 为汽车不足转向系数, $s^2 \cdot m^{-2}$; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; μ 为路面附着系数; G 为转向器固定传动比 ($G=20$).

2.2 控制器设计

由图1的二自由度模型得到线性化微分方程(1),此方程经过了大量简化,没有考虑轮胎侧偏特性的非线性和侧向风引起的车身侧倾而导致的车轮载荷的转移,也没有考虑悬架变形等因素.因此,实际车辆模型存在大量非线性问题,即使采用更多的自由度、更多的微分方程来描述汽车的运动,仍然存在大量未建模状态、非线性和耦合. PID 控制、模糊控制、 H_∞ 控制等对模型的依赖程度高,对于非线性耦合问题需进行大量的计算才能解耦;基于线性二自由度动力学方程设计自抗扰控制器处理侧向风干扰,把前述动力学方程中存在的问题:轮胎侧偏刚度的非线性、车轮载荷转移、悬架变形、侧向风干扰等均视为外界对车辆的扰动,根据系统输入输出实时估计这种扰动,并采用非线性反馈方式对这种扰动进行动态补偿,可以达到良好的目标值跟踪效果.

令 $\dot{x}_1 = x_2 = \dot{\psi}$, 式(2)第一个方程可写成如下二阶系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w) + b_1 \delta; \\ y^* = x_1. \end{cases} \quad (5)$$

对于由方向盘转角得到的理想参考 $\dot{\psi}_d$ 进行过

渡过程得到 $\dot{\psi}_d$, 为自抗扰控制器提供误差信号.

$$\begin{cases} fh = fhan(v_1 - \dot{\psi}_d, v_2, r, h); \\ \dot{v}_1 = v_2, \dot{v}_2 = fh. \end{cases} \quad (6)$$

式(6)给出由 $\dot{\psi}_d$ 得到 $\dot{\psi}_d$ 的算法,函数 $fhan$ 的表达式见文献[11]式(2.4.6), $v_1 \rightarrow \dot{\psi}_d, v_2 \rightarrow \dot{\psi}_d$. 这里, h 微积分步长, r 为跟踪速度因子,其值越大达到稳态值的时间越短. 同样,根据方向盘转角输入可以得到 δ_{sw} , 从而得到 $\delta_f = \delta_{sw}/G$.

$f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w)$ 为包括未建模误差、参数误差、侧向风等内外扰的总和扰动,采用如下扩张状态观测器(extended state observer, ESO)^[11]估计系统状态和总和扰动,其中 z_1, z_2 分别估计状态 $x_1, x_2; z_3$ 估计总和扰动 $x_3 = f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w)$.

$$\begin{cases} e = z_1 - y^*; fe = fal(e, 0.5, \Delta); \\ fe_1 = fal(e, 0.25, \Delta); \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e; \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fe + b_1 \delta; \dot{z}_3 = -\beta_{03}fe_1. \end{cases} \quad (7)$$

式中, fal 为非线性函数,由下式确定

$$fal(e, \xi, \Delta) = \begin{cases} |e|^\xi \text{sign}(e), & |e| > \Delta; \\ e\Delta^{\xi-1}, & |e| \leq \Delta. \end{cases} \quad (8)$$

式中, ξ 和 Δ 是正数, sign 为符号函数. 大多数情况下, $\xi=0.5, \Delta=0.01$.

系统状态误差 $e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2$, 本文选用误差反馈控制律 u_0 :

$$u_0 = -fhan(e_1, ce_2, r, h_1). \quad (9)$$

令 $U = b_1 \delta = u_0 - z_3$, 则控制量 $u = \delta_a$ 用反馈控制量 u_0 和扰动估计值 z_3 通过扩张状态观测器动态给出,扩张状态观测器成为纯积分器串联型观测器,而最终控制变量前轮附加转角 δ_a 由 δ_a 通过积分得到.

$$u = \delta_a = (u_0 - z_3 - b_1 \delta_{sw}/G)/b_1. \quad (10)$$

从式(5)~式(10)控制器算法中可知,对于总和扰动 $x_3 = f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w)$, 无论是线性、非线性、是否可观、是否具有具体模型等均统一进行处理,由控制器根据系统输入输出实时估计这种扰动,没有针对具体对象,因此,自抗扰控制器算法的可移植性好.

汽车抗侧向风干扰自抗扰控制器结构如图4所示. 驾驶员模型给出方向盘转角 δ_{sw} , 扩张状态观测器根据二自由度模型设计,车辆模型使用 CarSim 软件中模型,由 δ_{sw} 和 δ_a 共同控制. 图中虚线框内部分为 ADRC 控制器.

对于二阶系统(5)无论是否存在耦合,在自抗扰控制器中,用 z_3 估计 $f_1(\psi, \dot{\psi}, a_y, M_w)$, 只要 y^* 是可测量的,则用自抗扰控制器实现参数的解耦控制,无复杂的矩阵解耦运算,算法实时性好. 同时,

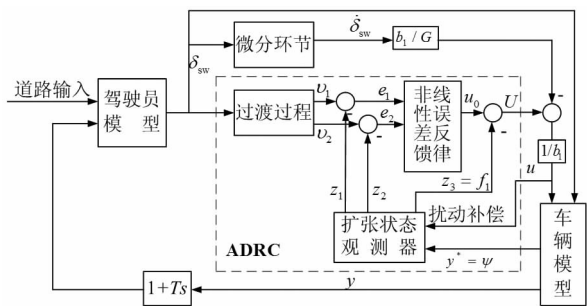


图4 抗侧向风干扰自抗扰控制器结构图

控制器还用到了方向盘转角的微分 δ_{sw} , 考虑了转动方向盘的快慢程度, 用到了更多的已知信息, 使得控制器的跟踪效果更好。

3 仿真验证与结果分析

为验证提出的抗侧向风干扰自抗扰控制器的控制效果和路径跟踪性能, 在 Matlab 软件 Simulink 模块中建立了人-车-路的闭环控制模型, 由单点预瞄驾驶员模型给出的方向盘转角为已知输入, 控制 CarSim 软件车辆模型 (CS B-CLASS) (其主要参数见表 1) 进行双移线仿真试验, 模拟汽车躲避障碍物, 验证控制器的有效性。

表 1 车辆基本参数及控制器主要参数

参数名称	数值
整车质量/kg	1 231
质心距前轴距离/m	1.04
质心距后轴距离/m	1.56
前轮侧偏刚度/(N · rad ⁻¹)	112 690
后轮侧偏刚度/(N · rad ⁻¹)	112 690
整车绕 z 轴转动惯量/(kg · m ²)	2 331
$\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$	200, 500, 1 000

选择车速为 100 km/h 和 120 km/h 分别进行双移线道路仿真试验, 试验路径、标桩按标准试验^[15] 随速度变化进行适应性设置 (吉林工业大学汽车动态模拟国家重点实验室技术报告), 图 5 为双移线试

验标桩位置. 由标桩围成的轨道中心线是一折线, 对汽车来说是不可能实现这样的行驶轨迹. 因此, 在仿真试验中对不圆滑轨道进行预瞄修正^[14]. AB, CD 段为满足边界条件的 3 次样条曲线. 路面附着系数为 0.85, 仿真结果见图 6 ~ 图 10.

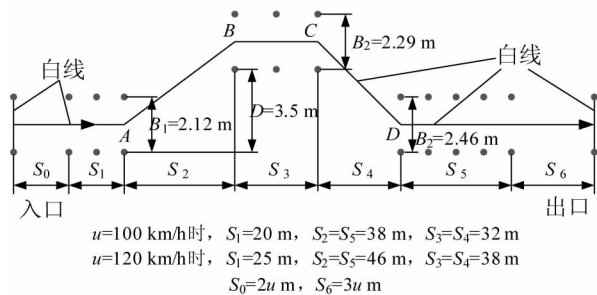


图 5 双移线试验标桩位置

图 6 为高速双移线试验侧向位移曲线. 图中将无风无控制、有风无控制及有风有控制 3 种情况下的仿真结果与预期路径进行对比, 无控制下的双移线试验与预期路径偏离较大, 有风时偏离尤其严重, 在试验结束时汽车不能回到直线路径. 试验结果表明侧向风干扰对汽车的行驶路径有较大的影响. 在自抗扰控制器控制下, 汽车仿真行驶轨迹与预期路径符合较好, 双移线试验回到直线 (稳态) 状态时间短, 没有超调量. 在仿真试验时, 还对比了控制器工作时有风和无风情况的路径跟踪情况, 结果表明 2 条轨迹线重合, 说明自抗扰控制器很好地抑制了侧向风对汽车行驶路径的干扰。

图 7、图 8 分别为侧向加速度曲线和车身横摆角速度曲线. 从仿真结果可知在侧向风干扰下, 侧向加速度和横摆角速度曲线均出现振荡现象, 直线行驶时需不断修正行驶方向; 控制车辆的仿真结果表明, 双移线试验回到直线段路径时, 汽车在极短的时间内达到稳态. 在直线行驶时, 侧向风干扰对汽车的行驶没有影响, 驾驶员不需要改变操作习惯。

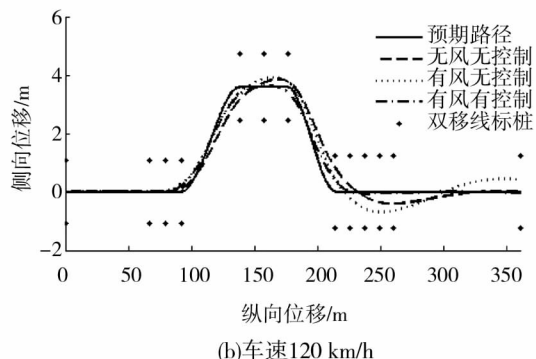
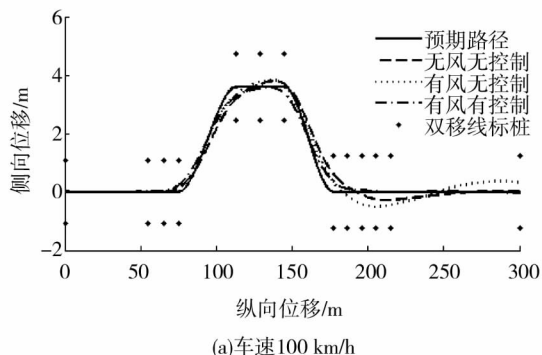


图 6 高速双移线试验侧向位移曲线

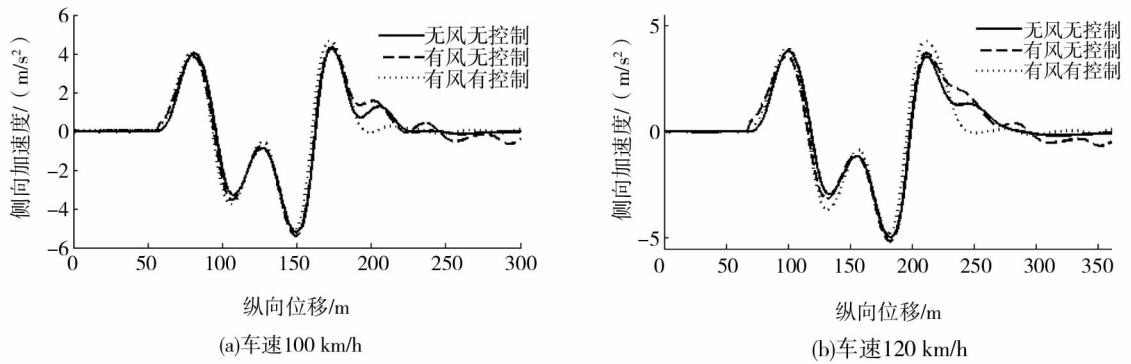


图7 高速双移线试验侧向加速度曲线

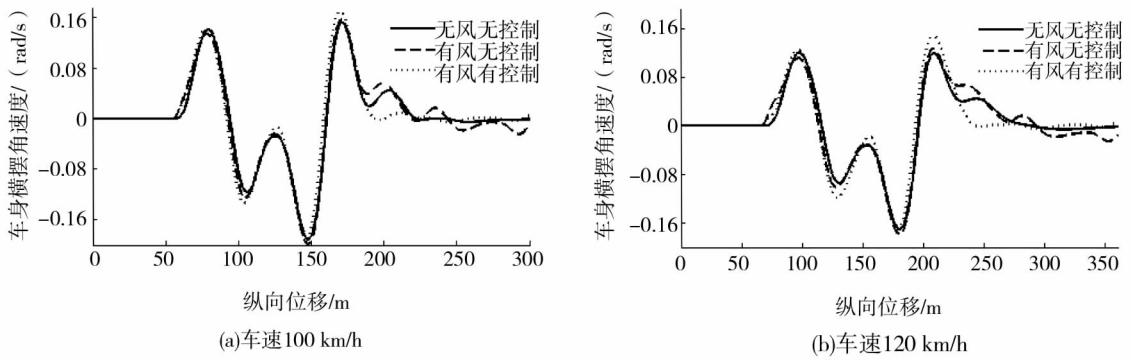


图8 高速双移线试验横摆角速度曲线

图9为双移线试验前轮实际转角.图示表明在部分时段,控制车辆的前轮转角大于未控制车辆,

体现在侧向加速度和横摆角速度曲线上,对应数值略有增加.图10为控制器控制输出.

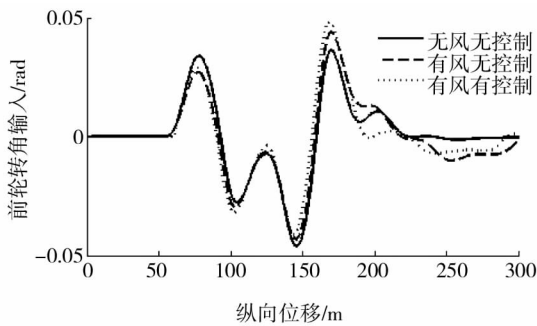


图9 100 km/h 双移线试验前轮转角曲线

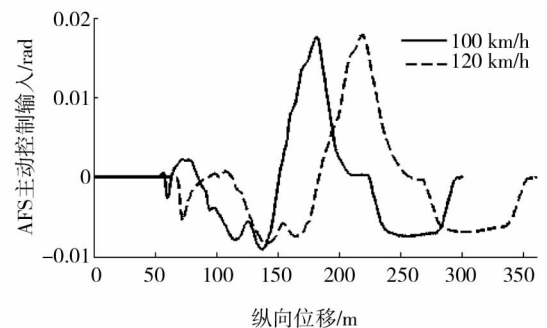


图10 高速双移线试验控制器控制输出曲线

用同样的控制器参数控制车辆模型进行车速为100 km/h和120 km/h仿真试验,达到同样的控制效果,表明控制器对车速的适应性好,控制器具有好的鲁棒性.把侧向风干扰视为对车辆的一种扰动进行自抗扰AFS控制器的设计,使得控制器不仅对侧向风干扰具有抑制作用,对其它扰动同样具有抑制作用,控制器对车辆的内外扰具有普遍的抑制作用.

4 结论

1)侧向风影响汽车操纵稳定性能,增加驾驶员操作难度.

2)基于自抗扰技术设计了抗侧向风干扰AFS控制器,控制器控制汽车较好完成侧向风干扰下的高速双移线试验,路径跟踪效果好,偏差小;控制车辆达到稳态的响应时间和超调量方面均好于未控制车辆,且控制器鲁棒性好.

3)所设计的 AFS 控制器对模型精度要求不高,适应性强.在设计控制器时把侧向风干扰、未建模状态、参数不确定等视为对车辆扰动,对其进行统一处理,使控制器的可移植性好,可用于对其它干扰的抑制.采用 ADRC 技术设计控制器的方法对处理汽车其它系统的非线性问题、耦合问题具有极强的指导意义和参考价值.

参考文献:

- [1] Maruyama Y, Yamazaki F. Driving simulator experiment on the moving stability of an automobile under strong crosswind[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,2006,94(4):191-205.
- [2] Braghin F, Cheli F, Corradi R, et al. Active anti-rollover system for heavy-duty road vehicles [J]. *Vehicle System Dynamics*,2008,46(sup):653-668.
- [3] Kyuwon K, Boemjun K, Youngil G, et al. An investigation on motor-driven power steering-based crosswind disturbance compensation for the reduction of driver steering effort[J]. *Vehicle System Dynamics*,2014,52(7):922-947.
- [4] Kee J D, Rho J H, Kim K H, et al. High speed driving stability of passenger car under crosswind effects [J]. *International Journal of Automotive Technology*,2014,12(5):741-747.
- [5] Alfi S, Bruni S, Diana G, et al. Active control of airspring secondary suspension to improve ride quality and safety against crosswinds [J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*,2010,225(1):84-98.
- [6] Dirk T, Mats B, Rickard P, et al. Improving crosswind stability of fast rail vehicles using active secondary suspension [J]. *Vehicle System Dynamics*,2014,52(7):909-921.
- [7] 谷正气,周宇奎,海贵春,等.主动四轮转向系统对高速汽车侧风稳定性的控制研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2006,33(1):51-54.
- [8] 丁能根,康乐,王健,等.侧向风干扰下的汽车主动前轮转向最优控制[J].*北京工业大学学报*,2013,39(2):161-165.
- [9] 赵景波,周冰,贝绍轶.侧风干扰工况电动汽车 EPS 反向助力控制及试验[J].*电机与控制学报*,2012,16(9):103-109.
- [10] 李强,施国标,林逸,等.主动前轮转向控制技术现状与展望[J].*汽车工程*,2009,31(7):629-633.
- [11] 韩京清.自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [12] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [13] 郭孔辉.驾驶员-汽车闭环系统操纵运动的预瞄最优曲率模型[J].*汽车工程*,1984(3):1-16.
- [14] 郭孔辉.汽车操纵动力学原理[M].江苏:江苏科学技术出版社,2011.
- [15] International Standardization Organization. ISO/FDIS3888-1. Passenger cars - test track for a severe lane change manoeuvre - part 1: double lane change [S]. Geneva: International Standardization Organization,1999.