

# 侧向风干扰下的汽车主动前轮转向最优控制

丁能根, 康 乐, 王 健, 余贵珍

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 侧向风对汽车行驶操纵稳定性有重要影响. 通过分析侧向风干扰下车辆稳定性, 提出基于主动前轮转向 (active front wheel steering, AFS) 的控制策略. AFS 控制器采用线性二次型最优控制算法, 以实现横摆角速度和质心侧偏角目标值跟踪. 为了评价控制算法, 基于 MATLAB/Simulink 和 CarSim 协同仿真环境建立整车动力学模型、单点预瞄驾驶员模型、控制器模型、道路和侧向风模型. 仿真结果表明, AFS 可有效提高车辆在侧向风干扰下的操纵稳定性, 且控制算法对车速和路面附着系数具有良好的鲁棒性.

**关键词:** 侧向风; 主动前轮转向; 线性二次型最优控制器

中图分类号: U 461.6

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2013)02-0161-05

## Optimal Control of Active Front Wheel Steering for Vehicles Under Perturbation of Crosswind

DING Neng-gen, KANG Le, WANG Jian, YU Gui-zhen

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Crosswind has substantial influence on the handling and stability of vehicles. Based on the analysis of vehicle stability under perturbation of crosswind, a control strategy for active front wheel steering (AFS) is proposed. The controller was designed using linear quadratic optimal control algorithm with the aim of tracking the target values of yaw rate and side slip angle. Based on the co-simulation platform of MATLAB/Simulink and CarSim, vehicle dynamics model, single-point preview driver model, controller model, and road and crosswind models were built to evaluate the control algorithm. Simulation results show that AFS can effectively improve vehicle handling and stability under crosswind, and has good robustness against variation of vehicle speed and tire/road friction coefficient.

**Key words:** crosswind; active front wheel steering; linear quadratic optimal controller

侧向风尤其是强侧向风,影响行车操纵稳定性及安全性.在强风引起的大侧向力和横摆力矩作用下,车辆易偏离期望路径<sup>[1]</sup>,驾驶员不得不频繁操纵转向盘修正,从而造成驾驶紧张与疲劳,甚至引发危险事故.2010年9月19日,一辆集装箱挂车途经福建青州大桥时突遇侧风,车身被吹翻.与此同时,一辆小车也被吹得变道,与后侧货车发生刮擦.在

日本,如果平均风速在10 min内持续高于25 m/s,高速公路即强制关闭<sup>[2]</sup>.

国内外相关学者相继开展提高车辆侧向风干扰下稳定性的主动控制研究:Maruyama等<sup>[2]</sup>提出采用基于模糊控制附加横摆力矩方法削弱侧向风的影响,提高车辆直线行驶稳定性;Braghin等<sup>[3]</sup>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

收稿日期: 2011-02-22.

基金项目: 国家863计划资助项目(2009AA11Z216);国家自然科学基金资助项目(50908008).

作者简介: 丁能根(1965—),男,副教授,主要从事汽车动力学及其控制、汽车底盘电子控制方面的研究, E-mail: dingng@buaa.edu.cn.

倾稳定性; Alfì 等<sup>[4]</sup>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; 湖南大学谷正气等<sup>[5]</sup>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。

在诸多旨在提高车辆操纵稳定性的控制系统中, 主动前轮转向( active front wheel steering, AFS) 技术是当车辆遇紧急操纵工况或外界干扰时, 通过附加前轮转角辅助驾驶员操纵, 起到稳定车辆和减少驾驶员疲劳与紧张的双重作用<sup>[6-7]</sup>。AFS 实现方便、效果好的特点使其在车辆安全系统设计得到广泛应用。宝马 3 系和 5 系轿车上已配备自行研制 AFS 系统<sup>[8]</sup>。然而, 作为 AFS 系统核心的控制算法研究仍然是研究的热点。

本文通过分析侧向风干扰下车辆响应, 提出线性二次型最优 AFS 控制器, 用于提高车辆在侧向风干扰下的操纵稳定性。控制器设计分别以驾驶员转角和主动前轮转角为已知输入和控制输入, 使车辆跟踪横摆角速度和质心侧偏角目标值。采用双移线试验工况模拟侧向风环境下驾驶员躲避障碍物的驾驶操作, 对比分析了有、无 AFS 控制时车辆的响应。根据系统瞬态响应特性分析了 AFS 对汽车稳定性的影响, 表明控制器具有提高车辆在侧向风干扰下行车稳定性的作用。

### 1 侧向风干扰下车辆响应

车辆高速行驶时, 侧向风是主要的外界干扰之一。由于侧向风的随机性和复杂性, 国内相关领域学者建立了 4 种符合国情的侧向风模型: 阶跃阵风、平缓过渡阵风、呈正弦变化阵风和随机阵风<sup>[9]</sup>。国外研究者基于实车试验建立了归一化的随机侧向风模型, 通过有无侧向风环境下车辆力和力矩测试数据之差建立<sup>[10]</sup>。本文采用随机阵风作为侧向风干扰输入, 如图 1 所示。阵风幅值 50 km/h, 相当于 7 级风, 属强风范围。

为分析侧向风干扰下的车辆操纵稳定性, 采用文献[9]中给出的附加纵向力、侧向力、空气升力、横摆力矩、侧倾力矩和俯仰力矩表达式建立了侧向风模型。采用 CarSim 动力学仿真软件建立了整车多体模型、侧向风模型和单点预瞄最优曲率驾驶员模型, 在双移线工况下仿真分析了侧向风干扰下车辆的响应。

图 2 是车辆在路面附着系数为 0.85 的路面上

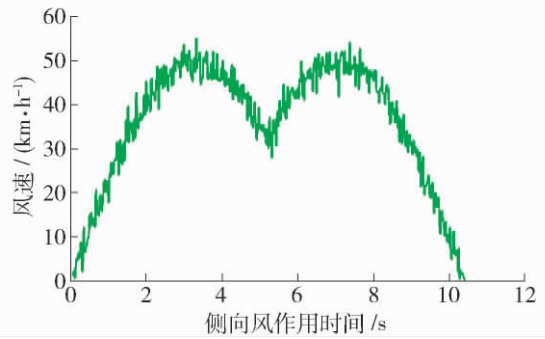
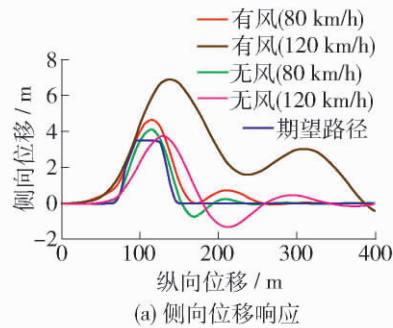
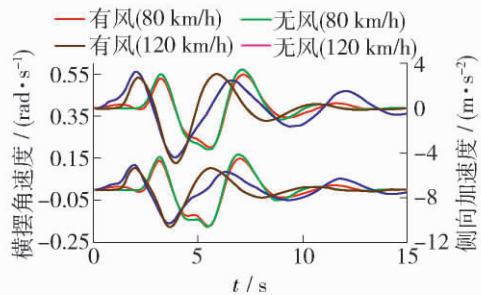


图 1 随机正弦阵风风速曲线

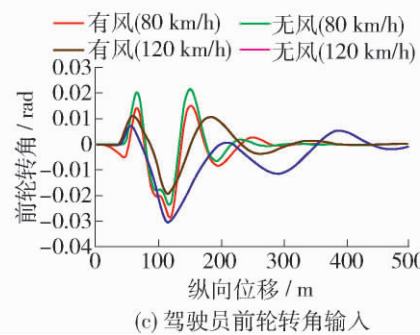
Fig. 1 Curve of random sine gust wind velocity



(a) 侧向位移响应



(b) 横摆角速度和侧向加速度响应



(c) 驾驶员前轮转角输入

图 2 侧向风干扰下车辆响应

Fig. 2 Vehicle response under crosswind

分别以车速 80 和 120 km/h 进行双移线时的响应。从图 2(a) 车辆行驶轨迹来看, 有侧向风时车辆侧向位移偏离期望值较大, 且车速越高偏离量越大。当车速达 120 km/h 时, 车辆已超出宽约 3.7 m 的车道。在换道前的直线行驶段, 侧向风一旦介入, 车辆横摆角速度、侧向加速度(图 2(b)) 和侧向位移

即发生改变,驾驶员不得不介入转向进行修正(图2(c)).另外,侧向风使移线完成后车辆稳定时间变长,且驾驶员因需要完成更多的转向修正容易引起驾驶疲劳与紧张.

## 2 AFS 控制器设计

### 2.1 AFS 控制系统结构

AFS 控制目的在于提高车辆行驶操纵稳定性、减轻驾驶疲劳及在侧向风等干扰作用时削弱干扰产生的大侧向力和横摆力矩对车辆的影响.所设计 AFS 控制器控制目标为实现质心侧偏角和横摆角速度目标值的跟踪.闭环控制系统如图3所示.

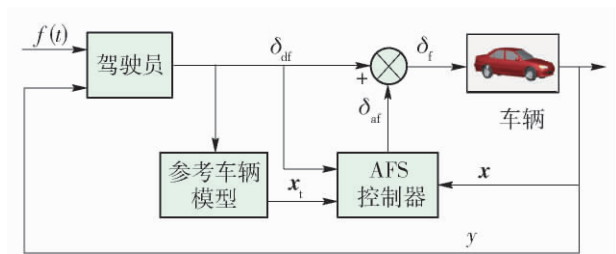


图3 闭环控制系统原理

Fig.3 Schematic diagram for the closed control system

系统以期望的路径  $f(t)$  为输入,以车辆实际行驶路径  $y$  为输出,以质心侧偏角和横摆角速度为状态变量  $x$ ,由驾驶员、参考车辆模型、线性二次型最优主动转向控制器和车辆组成.前轮转角输入  $\delta_f$  由驾驶员转向盘输入  $\delta_{df}$  和主动转向输入  $\delta_{af}$  两部分组成.AFS 控制器以实际状态变量  $x$ 、目标状态变量  $x_i$  和驾驶员转角  $\delta_{df}$  为输入,主动转向角  $\delta_{af}$  为输出.

### 2.2 参考车辆模型和控制目标

车辆的操纵稳定性主要取决于轮胎的非线性饱和特性,强侧向风干扰下轮胎极易进入非线性区.普通驾驶员对于此时车辆的操控是陌生的,并且极有可能因恐慌产生错误操作,造成严重事故.为了使车辆在强侧向风干扰下也能像在线性区一样容易操纵,AFS 控制器设计一般以线性二自由度车辆稳态转向特性推导的车辆状态为期望状态.

根据线性二自由度车辆模型<sup>[11]</sup>确定车辆期望横摆角速度和侧偏角

$$r_d = \frac{v_x/L}{1 + Kv_x^2} \delta_{df} \quad (1)$$

$$\beta_d = \frac{v_x^2}{L(1 + Kv_x^2)} \left( \frac{b}{v_x^2} + \frac{ma}{k_2 L} \right) \delta_{df} \quad (2)$$

式中:  $v_x$  为车辆纵向速度;  $m$  为整车质量;  $L$  为轴距;

$a$ 、 $b$  分别为质心到前、后轴的距离;  $k_1$ 、 $k_2$  分别为前、后轴轮胎总侧偏刚度;  $K$  为表征车辆稳定性的因数,  $K = \frac{m}{L^2} \left( \frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right)$ .

但上述期望值并不总能实现,强制实现反而不安全,必须根据轮胎/路面附着系数加以限制.附着系数可通过车辆状态量测信号实时估计得到.横摆角速度和质心侧偏角上限值分别为<sup>[11]</sup>

$$r_u = 0.85 \frac{\mu g}{v_x} \quad (3)$$

$$\beta_u = \arctan(0.02\mu g) \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为路面附着系数;  $g$  为重力加速度.

因此,AFS 控制系统中横摆角速度和质心侧偏角的目标值确定为

$$r_i = \begin{cases} r_d, & |r_d| \leq r_u \\ r_u \operatorname{sgn}(r_d), & |r_d| > r_u \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta_i = \begin{cases} \beta_d, & |\beta_d| \leq \beta_u \\ \beta_u \operatorname{sgn}(\beta_d), & |\beta_d| > \beta_u \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 线性二次型最优控制器设计

以  $x = [\beta \ r]^T$  为状态变量,采用如下形式的状态方程<sup>[12]</sup>设计控制器:

$$\dot{x} = Ax + Bu_1 + Bu_2 \quad (7)$$

式中:  $u_1 = \delta_{df}$ 、 $u_2 = \delta_{af}$ . 矩阵  $A$  和  $B$  分别为

$$A = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_2}{mv_x} & \frac{ak_1 - bk_2}{mv_x^2} - 1 \\ \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} & \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{I_z v_x} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{-k_1}{mv_x} \\ \frac{-ak_1}{I_z} \end{bmatrix}$$

定义性能指标

$$J = \int_0^\infty [w_1(\beta - \beta_i)^2 + w_2(r - r_i)^2 + w_3 \delta_{af}^2] dt = \int_0^\infty [(x - x_i)^T Q (x - x_i) + u_2^T R u_2] dt \quad (8)$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$  和  $w_3$  分别为加权系数;  $Q = \begin{bmatrix} w_1 & 0 \\ 0 & w_2 \end{bmatrix}$ ;

$$R = [w_3]; \quad x_i = \begin{bmatrix} \beta_i \\ r_i \end{bmatrix}.$$

令  $G = A^T - PBR^{-1}B^T$ ,  $E$  为单位矩阵.对于上述最优问题,通过求解 Riccati 方程  $PA - PBR^{-1}B^T P + Q + A^T P = 0$  得到控制输入

$$u_2 = K_1 x + K_2 x_i + K_3 u_1 \quad (9)$$

式中:增益矩阵  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为

$$K_1 = -R^{-1}B^T P, \quad K_2 = -R^{-1}B^T G^{-1}Q,$$

$$K_3 = R^{-1}B^T G^{-1}PE$$

### 3 仿真结果与车辆瞬态响应特性分析

#### 3.1 仿真结果

以单点预瞄驾驶员模型代替实际驾驶员, CarSim 动力学仿真软件表征实际车辆, 采用双移线行驶工况, 车辆在风速峰值为 50 km/h 随机侧向风干扰下行驶, 驾驶员预瞄时间 1.2 s. 驾驶员模型和 AFS 控制模型基于 MATLAB/Simulink 建立, 根据车辆输出状态经过控制器计算主动前轮转角输给 CarSim 车辆模型, 模拟实车试验. 仿真车辆参数及控制器参数如表 1 所示. 其中加权系数  $w_1$ 、 $w_2$  和  $w_3$  分别为 20、1 和 1, 表明对车辆稳定性的重视程度要高于对转向操纵性和前轮附加转角能量消耗的重视程度, 体现了重在提高车辆抗侧向风干扰能力的控制算法设计意图.

表 1 车辆参数及控制器参数

Table 1 Parameters for vehicle and controller design

参数名称	数值
整车质量 $m/\text{kg}$	940.2
质心距前轴距离 $a/\text{m}$	0.9479
质心距后轴距离 $b/\text{m}$	1.352
前轮侧偏刚度 $k_1/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-65718
后轮侧偏刚度 $k_2/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-50435
整车绕 $z$ 轴转动惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1250
加权系数 $w_1$	20
加权系数 $w_2$	1
加权系数 $w_3$	1

路面附着系数设为 0.85, 车速分别为 80 和 120 km/h 时有 AFS 控制器和无 AFS 控制器仿真结果对比如图 4 所示. 从车辆行驶轨迹(图 4(a)) 可看出, 车辆在侧向风干扰下借助 AFS 控制器的辅助, 能保持在期望车道内行驶, 且较好地跟踪期望路径. 车辆横摆角速度和侧向加速度在侧向风干扰下出现的震荡增加、稳定时间增加等现象也得到明显削弱. 直线行驶段侧向风介入痕迹基本消除, 驾驶员不需过多修正转向盘. 从主动前轮转角输入(图 4(c)) 来看, 其方向与侧向风方向以及车辆响应偏差变大方向相反, 可见控制器起到修正车辆实际状态与目标状态偏差的作用. 车速改变之后, 控制器仍能起到良好的控制效果, 所设计控制器相对于车速的鲁棒性较好.

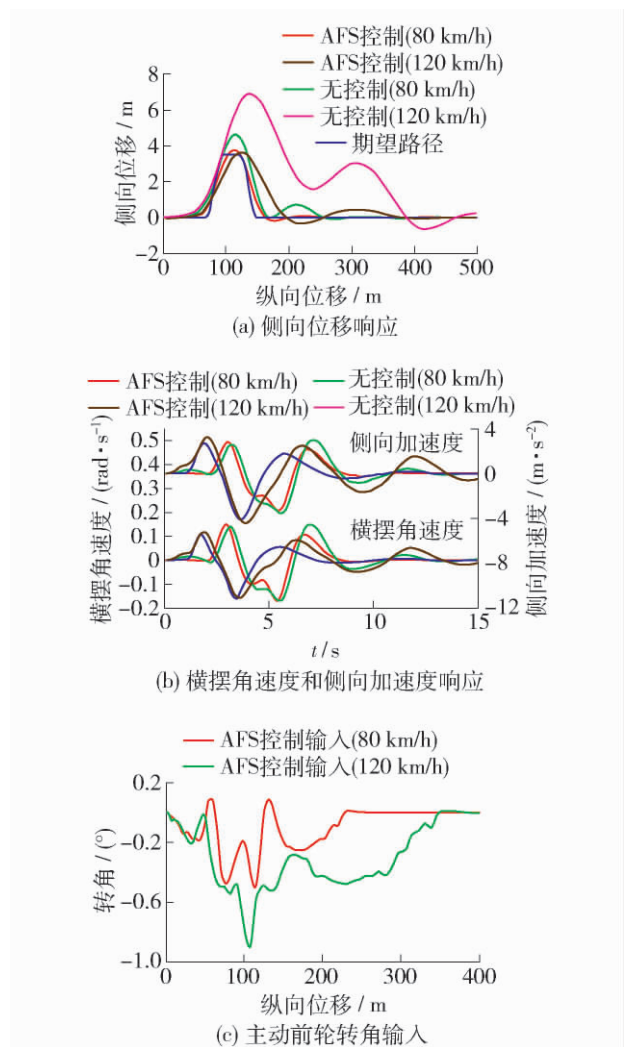


图 4 AFS 控制车辆在侧向风干扰下响应

Fig. 4 Vehicle response under crosswind with AFS

为验证控制器在低附着路面上的鲁棒性, 将路面附着系数设为 0.2、车速 70 km/h 进行仿真, 结果如图 5 所示. 强侧向风、低附着路面模拟实际中大风、雨雪天气行车. 由仿真结果可看出, 在这种工况下车辆一旦变道或超车, 驾驶员将无法操控车辆, 车

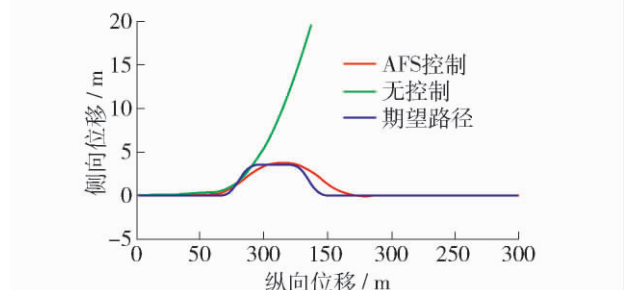


图 5 低附着路面 AFS 控制车辆在侧向风干扰下响应

Fig. 5 Vehicle response under crosswind with AFS on low friction road

辆失去控制超出车道,危险事故不可避免.对车辆进行AFS控制后,车辆安全变道或超车,车辆始终保持期望车道内,且距车道中心轨迹偏差量较小,车辆稳定性及安全行驶性得到提高.因此,所设计控制器在低附着系数路面仍能起到良好控制效果,对于路面附着系数也具有一定鲁棒性.

### 3.2 车辆瞬态响应特性分析

瞬态响应包括2方面的问题:一是行驶方向稳定性,即给汽车以转向盘阶跃输入后,汽车能否达到新的稳定状态;二是响应的品质,即达到新的稳定状态前,其瞬态响应的特性如何<sup>[13]</sup>.受此启发,下面分析车辆在道路阶跃输入(单移线)工况下的侧向位移瞬态响应以及闭环系统的稳定性和响应品质.图6(a)(b)分别是无外界干扰和有外界干扰时闭环系统瞬态响应.

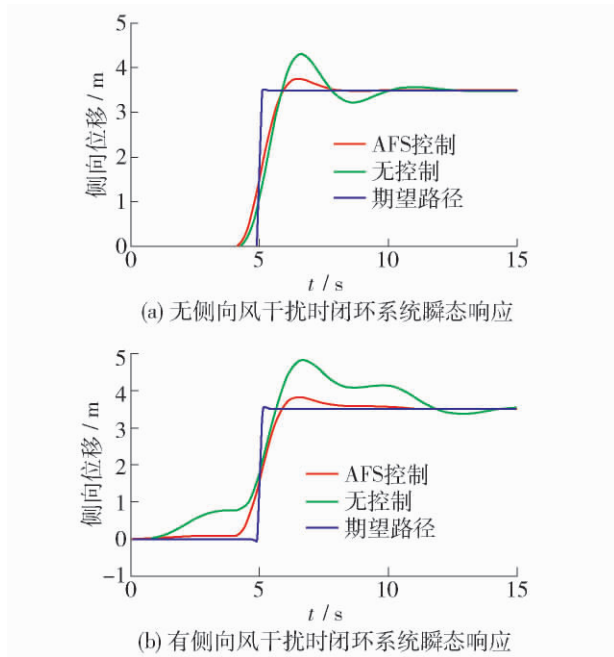


图6 闭环系统瞬态响应

Fig. 6 Vehicle transient response

从表2数值可看出,有AFS控制车辆反应时间虽较无控制车辆稍有增加,但系统超调量和稳定时

表2 瞬态响应评价参数

有无控制	反应时间/s	超调量/%	稳定时间/s
无(无风)	5.855	23.15	15.75
有(无风)	5.925	7.38	8.2
无(有风)	5.63	37.7	17.34
有(有风)	5.87	9.38	13.67

间降低.超调量表明车辆执行指令误差,表征操纵性能;稳定时间表明稳定性能.这2个参量数值减小表明车辆操纵性和稳定性得到提高.

## 4 结论

1) 在侧向风干扰下车辆跟踪期望轨迹性能变差、车辆响应稳定时间和超调量等增加,且侧向风介入后车辆响应的改变导致驾驶员操纵变得频繁.

2) AFS可改善车辆轨迹跟踪性能、减少稳定时间和超调量,且AFS提供的附加转角可减少驾驶员为消除侧向风干扰采取的修正操纵、减轻驾驶疲劳.

3) 在不同车速和路面附着系数下的仿真试验结果表明AFS对于二者具有较好鲁棒性.

4) 采用AFS后人-车闭环系统瞬态响应的超调量和稳定时间降低,表明AFS可同时改善车辆在侧向风干扰下的操纵性和稳定性.

## 参考文献:

- [1] BOADA B L, BOADA M J L, DÍAZ V. Yaw moment control for vehicle stability in a crosswind [J]. *Int J Vehicle Design*, 2005, 39(4): 331-348.
- [2] 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.
- [3] BRAGHIN F, CHELI F, CORRADI R, et al. Active anti-rollover system for heavy-duty road vehicles [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(supp): 653-668.
- [4] 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.
- [5] 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. (in Chinese)  
GU Zheng-qi, ZHOU Yu-kui, HAI Gui-chun, et al. Control research on high-speed vehicle stability under side wind using active 4WS [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition*, 2006, 33(1): 51-54. (in Chinese)
- [6] 李强,施国标,林逸,等.主动前轮转向控制技术研究现状与展望[J].*汽车工程*, 2009, 31(7): 629-633. (in Chinese)  
LI Qiang, SHI Guo-biao, LIN Yi, et al. Status quo and prospect of the research on active front steering control technology [J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(7): 629-633. (in Chinese)

(下转第173页)

- 测中的应用[J]. 测试技术学报, 2007, 21(4): 311-323.
- XIA Guo-rong, XU Zhi-sheng. Application of multiwavelet threshold denoising method in wire rope faults detection [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21(4): 311-323. (in Chinese)
- [15] 刘志刚, 钱清泉. 自适应阈值多小波故障暂态信号去噪方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 878-880.
- LIU Zhi-gang, QIAN Qing-quan. Adaptive shrinkage value de-noising method of fault transient signals with multiwavelets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(7): 878-880. (in Chinese)
- [16] STRELA V, HOLLER P N, STRANG G, et al. The application of multi-wavelet filter banks to image processing[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(4): 548-563.
- (责任编辑 杨开英)

---

(上接第165页)

- [7] MAMMAR S, KOENING D. Vehicle handling improvement by active steering [J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38(3): 212-242.
- [8] KOEHN P, ECKRICH M. Active steering—the BMW approach towards modern steering technology [C] // SAE 2004 World Congress & Exhibition. Detroit: SAE Technical Paper, 2004-01-1105.
- [9] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 56-78.
- [10] KLASSCN J. A generalised crosswing model for vehicle simulation purpose [J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37(supp): 350-359.
- [11] 丁能根, 余贵珍. 汽车动力学及其控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009: 211-214.
- [12] ORABY W A H, EL-DEMERDASH S M, SELIM A M, et al. Improvement of vehicle lateral dynamics by active front steering control [C] // Proceedings of the 2004 SAE Automotive Dynamics, Stability & Controls Conference and Exhibition. Detroit: SAE Technical Paper, 2004-01-2081: 386-398.
- [13] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 133-134.
- (责任编辑 杨开英)