

汽车 EPS/ABS 集成控制硬件在环研究*

刘显贵 陈无畏 初长宝 祝辉

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 针对汽车助力转向制动过程中的动力学耦合关系,通过建立汽车转向和制动系统模型,分别设计了单个 ABS 及 EPS 子系统控制器和集成控制器,对两系统进行了集成控制,并将控制器局域网络应用到两系统集成控制中,采用 SAE J1939 协议,设计了 CAN 总线通讯系统。最后基于 LabView 进行了软件仿真和硬件在环实车试验。结果表明:基于 CAN 通讯的集成系统工作稳定,抗干扰能力强,汽车在转向制动工况下综合性能得到改善。

关键词: 车辆 集成控制 电动助力转向 防抱死制动系统 控制器局域网

中图分类号: U463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0008-06

Hard-in-loop Analysis on Vehicle EPS/ABS Using Integrated Control Strategy

Liu Xiangui Chen Wuwei Chu Changbao Zhu Hui

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

In order to coordinate the conflicts of the EPS system and EPS system in steering and braking condition, the integrated control logic of the systems was put forward. First, EPS controller and ABS controller were designed separately, and then an integrated controller was set up and controller area network was carried out to integrated control system, the results of simulation and hard-in-loop (HIL) experiment under LabView proved that the proposed integrated control logic was correct and feasible. It could apparently improve the overall performance of vehicle.

Key words Vehicle, Integrated controller, Electric power steering, Anti-lock braking system, Controller area network

引言

为提高车辆的综合性能,将底盘各控制系统有机地融合起来,构成高可靠性和开放式的综合、相互协调工作的控制系统——集成控制系统,这方面的研究已经取得了较大进展^[1-3]。对 EPS 与 ABS 进行集成控制研究尚不多见。文献[4]对底盘转向、悬架、制动三系统通过设计协调控制器进行了仿真研究。但在助力转向制动工况下,汽车转向和制动两系统之间存在相互影响和制约的动力学耦合关系,而在此工况下汽车整体性能的提高依赖于这两

系统之间的协调工作,因此对两系统进行集成控制研究具有重要意义。

随着汽车集成化控制程度的不断提高,汽车各系统之间的通讯变得越来越重要。这要求互相独立的电子系统和装置间能进行有效的数据交换和信息传递。使用汽车网络不仅可以减少线束,而且能够提高各控制系统的运行可靠性,减少冗余的传感器及相应的软硬件配置,实现各子系统之间的资源共享。迄今已推出多种网络标准,如 J1850^[5]、VAN^[6]、CAN 等。在各种汽车网络中,CAN 以其独特的设计、优异的性能和极高的可靠性在汽车中得

收稿日期:2009-10-21 修回日期:2010-01-22

* 国家自然科学基金资助项目(50575064)

作者简介:刘显贵,博士生,主要从事汽车集成控制研究,E-mail: lxguiduc_3162@163.com

通讯作者:陈无畏,教授,博士生导师,主要从事车辆动力学及控制技术研究,E-mail: cww@mail.ah.hf.cn

到了广泛应用。

本文首先建立汽车底盘转向系统和制动系统模型,将局域网络CAN应用到两系统集成控制中,通过分析两系统动力学耦合关系,提出基于CAN通讯的集成控制策略。

1 系统模型

1.1 转向模型

假设汽车纵向运动不发生滑移,匀速前进,不考虑空气动力作用和左右轮的转角差,且轮胎侧偏特性处于线性范围。整车二自由度转向模型如图1所示^[7]。

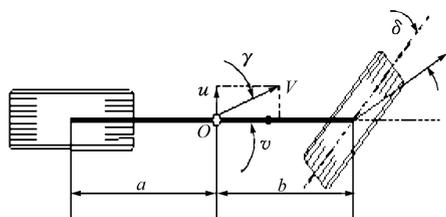


图1 二自由度汽车转向模型

Fig. 1 2-DOF vehicle steering model

对系统模型动力学分析,建立系统运动微分方程

$$(k_1 + k_2)\gamma + \frac{1}{u}(ak_1 - bk_2)\omega_r - k_1\delta = m(\dot{v} + u\omega_r) \quad (1)$$

$$(ak_1 - bk_2)\gamma + \frac{1}{u}(a^2k_1 + b^2k_2)\omega_r - ak_1\delta = J_2\dot{\omega}_r \quad (2)$$

图1及式(1)、(2)中各参数含意见文献[7]。

1.2 EPS模型

对转向齿轮助力式的EPS系统进行动力学分析,可得

$$T + K_s\delta_e = T_r + J_p\ddot{\delta}_1 + B_p\dot{\delta}_1 \quad (3)$$

式中 T ——转向盘操纵转矩
 δ_1 ——转向小齿轮转角
 δ_e ——助力电动机在转向小齿轮上助力转角
 K_s ——传感器扭矩刚度
 T_r ——路面作用于小齿轮轴的转矩
 J_p ——折算到小齿轮上的总惯性矩
 B_p ——当量阻尼系数

1.3 制动模型

对汽车制动过程进行动力学分析可得

$$m(\dot{u} - \gamma v) = -(F_{x1}\cos\delta + F_{x2} + F_{y1}\sin\delta) \quad (4)$$

$$I_f\dot{\omega}_1 = F_{x1}R_1 - T_{b1} \quad (5)$$

$$I_r\dot{\omega}_2 = F_{x2}R_2 - T_{b2} \quad (6)$$

式中 I_f, I_r ——前、后车轮转动惯量

ω_1, ω_2 ——前、后轮角速度

R_1, R_2 ——前、后车轮半径

T_{b1}, T_{b2} ——前、后轮制动力矩

F_{y1} ——前轮地面侧向力

F_{x1}, F_{x2} ——前、后轮地面切向力

1.4 其他模型

路面采用滤波白噪声模型^[3],轮胎采用双线性模型^[8],制动力矩模型见文献[4]。

2 集成控制系统设计

整个集成控制系统框图如图2所示。分别设计了集成控制器和EPS、ABS控制器。其中,集成控制器为决策控制器,EPS、ABS为执行控制器。当车辆正常行驶时,决策控制器起到了监控各执行控制器的作用,各系统传感器信号通过CAN总线传输到集成控制器,集成控制器对信号处理后对汽车主要性能指标进行判断监控;处理后的数值如在已设定的范围内,EPS、ABS控制器各自执行自己的任务,分别控制各个系统。传感器信号处理后的数值如不在已设定的范围内,集成控制器对EPS、ABS控制器发出控制指令,EPS、ABS控制器根据指令修改控制参数后控制各个子系统的工作,从而达到协调两系统工作、成为一个有机整体的目的。

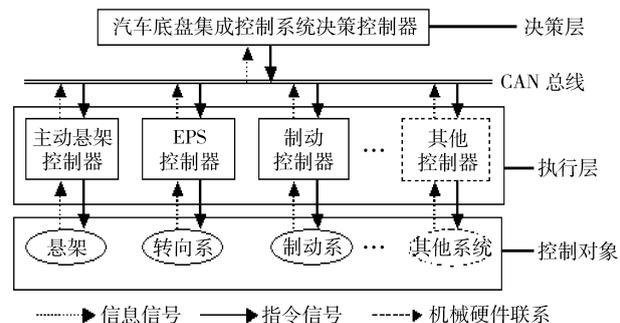


图2 集成控制系统框图

Fig. 2 Integrated control system block diagram

由图2可知,要进行底盘系统集成控制,需要设计执行层子系统控制器和决策层决策控制器。由于采用图2所示控制结构体系,本质上具有开放性,为了简化过程,减少工作量,已经设计好的各子系统控制器可以直接应用到底盘多系统集成控制的子系统控制器,不需要重新设计,这也体现出开放集成控制结构的优点:不但降低了整个控制系统设计的工作量和控制器设计的复杂程度,而且具有可扩展的优势,不需要对整个系统重新设计。

2.1 集成控制器设计

首先分析两系统相互作用及动力学耦合关系,确定两系统的决策控制参数,然后进行集成控制器的设计。

汽车转向依靠的是路面对轮胎的侧向力,在单独 EPS 转向过程中,由于侧向附着系数基本不变,路面作用于轮胎等效至转向柱的转矩 T , 保持基本不变。所以,电动机作用在转向系统上的助力矩 T_m 基本不变;然而,在转向制动过程中,由于侧向附着系数发生了显著变化,这时汽车制动滑移率为主要影响因素。另外,在设计 EPS 与 ABS 控制器的过程中可知,汽车车速为两系统共同的设计参数。因此,以滑移率和车速为设计集成控制器的决策控制参数。

集成控制器与各控制器通过 CAN 总线相连,根据滑移率和车速传感器信号,采用已设计好的规则控制算法向执行控制器发出指令信号,指导执行控制器 EPS 和 ABS 进行相应的动作,实现各子系统的功能。

集成控制器 CAN 通讯模块设计主要包括通讯协议制定和软件开发。本文采用 SAE J1939 协议,设计了 CAN 总线通讯系统,将总线上的信息按其优先级由高到低排列为:紧急信息、广播信息、命令信息、状态信息和数据信息。局域网集成控制器的软件开发主要包括局域网络初始化、局域网络数据发送和接收、局域网络中断处理等模块。设计好的集成控制系统 CAN 通讯拓扑结构及数据流向图如图 2 所示。

基于 ARM7 平台进行了集成控制器软件开发。集成控制器主程序流程图如图 3 所示。

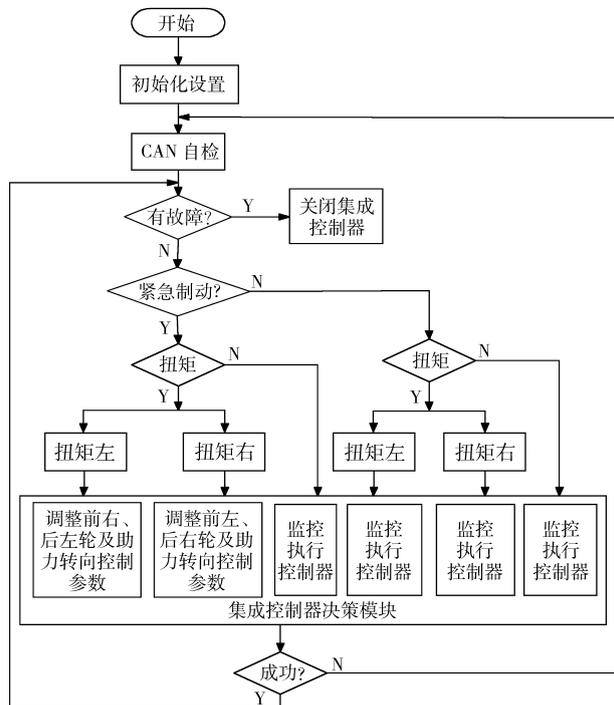


图 3 集成控制器主程序流程图

Fig. 3 Main program flow chart of integrated controller

2.2 EPS 控制器设计

EPS 系统采用自适应 LQG 控制。首先对系统模型进行参数辨识,将得到的 ARMAX 模型转换为离散状态空间模型和输出方程,即

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \Psi \mathbf{X}(k) + \Gamma \mathbf{u}(k) + \mathbf{K} \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{H} \mathbf{X}(k) + \mathbf{N} \mathbf{u}(k) + \mathbf{v}(k) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{w}(k)$ 为外界作用于系统的随机扰动, $\mathbf{v}(k)$ 为量测噪声,满足^[9]

$$E[\mathbf{w}(k)] = E[\mathbf{v}(k)] = 0 \quad (8)$$

$$E[\mathbf{w}(k) \mathbf{w}(k)^T] = \mathbf{Q}_0 \quad (9)$$

$$E[\mathbf{v}(k) \mathbf{v}(k)^T] = \mathbf{R}_0 \quad (10)$$

$$E[\mathbf{w}(k) \mathbf{v}(k)^T] = \mathbf{N}_0 \quad (11)$$

然后根据 LQG 最优问题,设计控制输入 \mathbf{u} , 使二次型性能指标函数 J 最小

$$J = \lim_{t_f \rightarrow \infty} E \left[\int_0^{t_f} [\mathbf{X}^T \quad \mathbf{u}^T] \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{N}_c \\ \mathbf{N}_c^T & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \right] \quad (12)$$

这样根据分离原理,LQG 问题就可以分解为两个子问题进行求解:

(1) 利用 Kalman 滤波理论,从状态 $\mathbf{X}(t)$ 中得到最优状态估计值 $\hat{\mathbf{X}}(t)$ 。

(2) 利用估计状态 $\hat{\mathbf{X}}(t)$ 代替 $\mathbf{X}(t)$,设计满足二次性能指标的 LQ 控制律。

最后按照文献[9]所述方法分别进行设计。

2.3 ABS 控制器设计

采用自适应模糊控制算法^[10]设计 ABS 系统,其控制结构框图如图 4 所示。

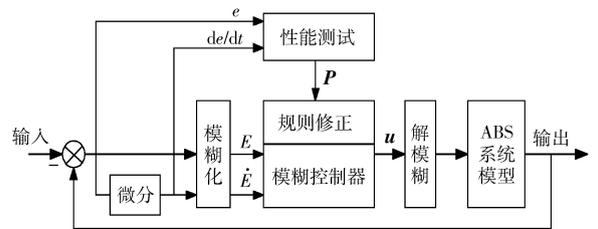


图 4 自适应模糊控制结构框图

Fig. 4 Block diagram of adaptive fuzzy control

由图 4 可知:ABS 系统的输入是期望滑移率 λ_0 与实际滑移率 λ 之差 e 及 e 的变化率;输出是制动油压 u 。

首先将输入输出变量模糊化,然后在原有的一般模糊控制器的基础上加上性能测试和规则修正这两个环节。

由性能测试所得到的输出响应校正量 $\mathbf{P}(n)$ 转化为对过程的输入校正量 $\mathbf{R}(n)$,并施加于过程,使系统的输出朝着期望的方向变化。因此有

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{M} \mathbf{R}(n) \quad (13)$$

用 $e(n-1)$ 、 $\dot{e}(n-1)$ 和 $u(n-1)$ 分别表示以往

的偏差、偏差变化率和控制量。而修正后的控制规则关系为

$$\mathbf{R}(n+1) = [\mathbf{R}(n) \cap \overline{\mathbf{R}_1(n)}] \cup \mathbf{R}_2(n) \quad (14)$$

根据式(14)求出新的修正关系矩阵 $\mathbf{R}(n+1)$ 后,再根据测得的偏差 $e(n)$ 和偏差变化率 $\dot{e}(n)$,与 $\mathbf{R}(n+1)$ 合成,求得控制量的模糊集,完成模糊控制规则的修正。

3 仿真分析

对上述底盘系统在 LabView 中进行仿真,设车速 $v = 10 \text{ m/s}$,转向盘转角输入为 180° 阶跃输入,其余各参数取值见表 1。

表 1 车辆参数

Tab.1 Vehicle parameters

参数	数值
整车质量 m/kg	750
转向轴到前轮的传动比 N_2	20
扭转刚度 $K_s/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$	90
当量惯性矩 $J_p/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.06
当量阻尼系数 $B_p/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$	0.3
前轮侧偏刚度 $C_f/\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$	95 707
后轮侧偏刚度 $C_r/\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$	84 243
前轮拖距 d/m	0.03
前轮到质心距离 a/m	1.219
后轮到质心距离 b/m	1.252
横摆转动惯量 $I_x/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	2 414
下截止频率 f_0/Hz	0.01
路面不平度系数 $G_0/\text{m}^3\cdot\text{cycle}^{-1}$	5.0×10^{-6}
制动杠杆比 i_b	4.45
操纵机构效率 η_p	0.75
助力器助力比 B	3.9
制动主缸直径 D_m/mm	22.22
推出压耗 p_0/MPa	3.5
车轮分泵面积 A_{wc}/m^2	0.000 289
分泵效率 η	0.75
制动器效能因数 B_f	2.15
制动鼓半径 r/m	0.1

集成控制仿真结果见图 5~9。由仿真结果可知:汽车在转向制动工况下,转向和制动两系统集成控制后,由图 5 可以看出横摆角速度响应较快,控制在 0.26 rad/s 以下,汽车操纵稳定性有所改善;而图 6 所示的方向盘操纵转矩基本保持不变,保证了汽车转向轻便性。

图 7、8 表示前、后轮滑移率较快地达到并保持在汽车最佳滑移率附近的水平。图 9 显示车辆的制动距离为 24.992 m ,较一般 ABS 系统制动距离有所偏大,但在可以接受的范围内。由以上分析可知:通

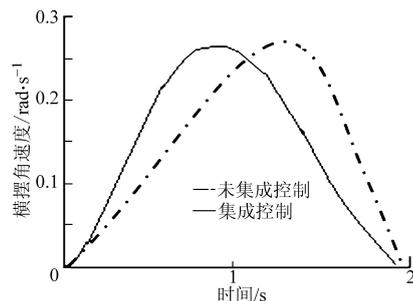


图 5 横摆角速度仿真结果

Fig. 5 Simulation result of yaw rate

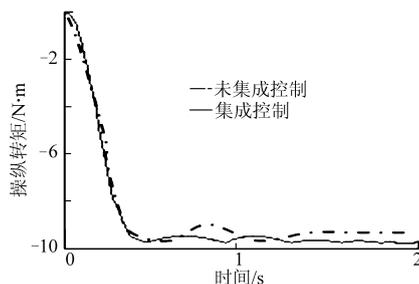


图 6 方向盘操纵转矩仿真结果

Fig. 6 Simulation result of input steering torque

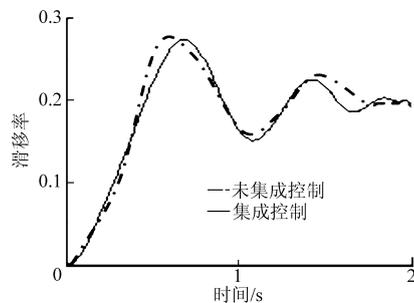


图 7 前轮滑移率仿真结果

Fig. 7 Simulation result of slip ratio of front wheel

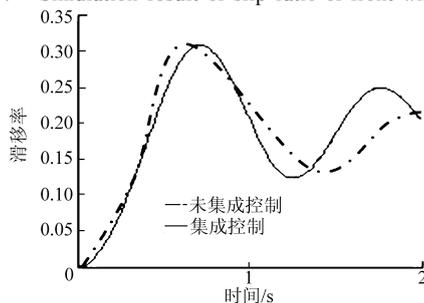


图 8 后轮滑移率仿真结果

Fig. 8 Simulation result of slip ratio of rear wheel

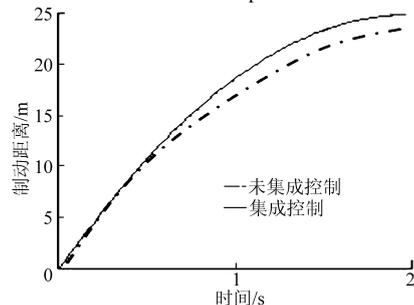


图 9 制动距离仿真结果

Fig. 9 Simulation result of brake distance

通过对 EPS 和 ABS 集成控制,虽然制动距离有所偏大,总的来说两系统动力学耦合关系得到改善,汽车底盘系统的综合性能得到提高。同时也证明了此控制策略的有效性和可行性。

4 硬件在环试验

为检验基于 CAN 通讯集成控制器的控制策略有效性,同时也为了验证设计的 CAN 通讯系统的有效性,进行了基于 LabView 的集成控制器硬件在环实车试验。试验系统布局如图 10 所示。

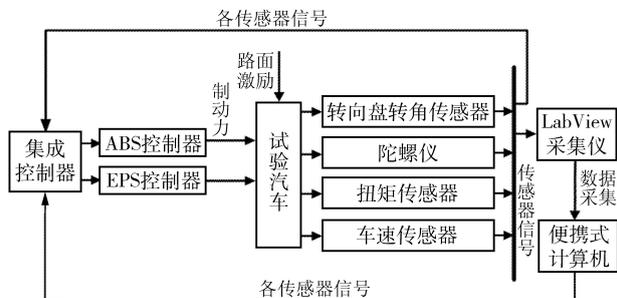


图 10 试验系统布局示意图

Fig. 10 Layout of test system

试验仪器有 PXI-8196 板卡、PXI-6289 数据采集卡、电源、轮速传感器、制动踏板传感器、逆变器、汽车动态信号实时分析仪(DSPS)、转矩转角测试仪、陀螺仪等。试验系统原理框图如图 11 所示。

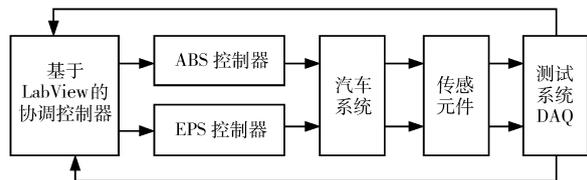


图 11 试验系统原理框图

Fig. 11 Block diagram of test system

在集成控制器工作情况下,固定转向盘转角(180°),让试验车以稳定车速(40 km/h)匀速圆周运动,然后进行紧急制动试验,通过 DSPS 测试相关数据,部分结果如图 12~15 所示。

由试验结果可知:

(1) 侧倾角、俯仰角均能被有效控制,集成控制器工作时车身姿态得到有效控制,车辆平顺性较好。

(2) 横摆角速度响应较快,集成控制器工作时车辆操纵稳定性得到改善。

(3) 转向盘操纵转矩基本维持在 $6\text{ N}\cdot\text{m}$,汽车转向轻便性得到保证。

5 结束语

在分析两系统相互作用及耦合关系,确定集成

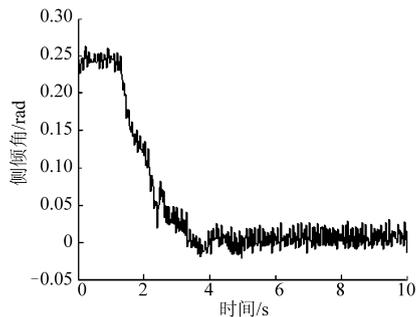


图 12 侧倾角试验曲线

Fig. 12 Experimental curve of roll angle

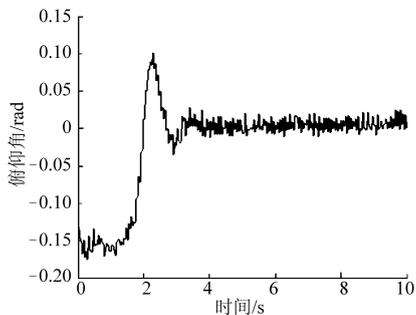


图 13 俯仰角试验曲线

Fig. 13 Experimental curve of pitching angle

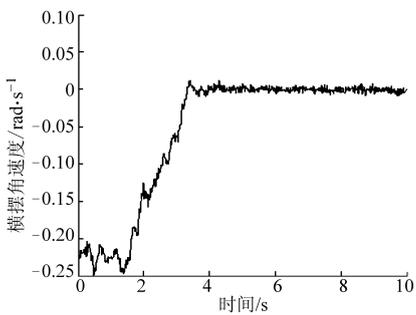


图 14 横摆角速度试验曲线

Fig. 14 Experimental curve of yaw rate

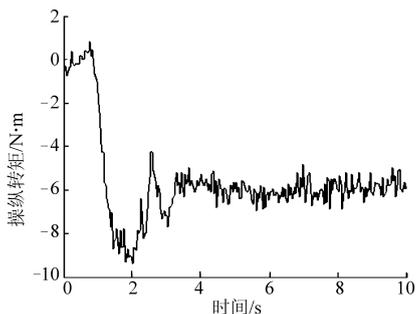


图 15 转向盘操纵转矩试验曲线

Fig. 15 Experimental curve of input steering torque

控制器的控制决策参数的基础上,分别设计了集成控制器和 EPS、ABS 控制器,最后基于 LabView 进行了软件仿真和硬件在环实车试验。结果表明,基于 CAN 通讯的集成系统工作稳定,抗干扰能力强,集成控制策略正确有效,在转向制动工况下,汽车综合性能得到改善。

参 考 文 献

- 1 冯金芝,喻凡,李君,等. 车辆防抱制动系统与主动悬架联合控制[J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 15~19.
Feng Jinzhi, Yu Fan, Li Jun, et al. An investigation on integrated control of vehicle anti-lock braking system and active suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 15~19. (in Chinese)
- 2 Ansgar Trachtler. Integrated vehicle dynamics control using active brake, steering and suspension systems[J]. Int. J. of Vehicle Design, 2004, 36(1): 1~12.
- 3 徐娟,谭继锦. 基于横向和垂向动力学的整车模型与仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 9~12.
Xu Juan, Tan Jijin. Modelling and simulation of integrated car system for its lateral and vertical dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 9~12. (in Chinese)
- 4 初长宝,陈无畏. 汽车底盘系统分层式协调控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(2): 157~162.
Chu Changbao, Chen Wuwei. Research on vehicle chassis system using layered coordinated control strategy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 157~162. (in Chinese)
- 5 ISO 11519-4 Class B data communication network interface (J1850)[S]. 1994.
- 6 ISO 11519-3 Vehicle area network (VAN)[S]. 1994.
- 7 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- 8 Scott Kimbrough. A computer investigation of the performance potential of an advanced brakecontroller[C]. SAE Paper 940836, 1994.
- 9 方崇智,萧德云. 过程辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1994.
- 10 王其东,王霞,陈无畏,等. 汽车主动前轮转向和防抱死制动协调控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 1~4.
Wang Qidong, Wang Xia, Chen Wuwei, et al. Coordination control of active front wheel steering and ABS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 1~4. (in Chinese)
- 11 陈无畏,孙启启,初长宝. 汽车电动助力转向与主动悬架系统的 H_{∞} 集成控制[J]. 振动工程学报, 2007, 20(1): 45~51.
Chen Wuwei, Sun Qiqi, Chu Changbao. Integrated H_{∞} control of electrical power steering and active suspension systems of an automobile[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(1): 45~51. (in Chinese)