

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.047

智能汽车并联电控液压制动系统设计与试验

袁朝春^{1,2} 范兴根¹ 袁慧颖³ 沈捷² 陈龙¹ 贝绍轶⁴

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013; 2. 密西根大学迪尔本分校, 迪尔本 MI 48128;

3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 4. 江苏理工学院汽车工程学院, 常州 213001)

摘要: 为提高智能汽车自动制动系统的性能及可靠性,设计基于传统液压制动系统的并联式电控液压主动防碰撞自动制动系统,针对整车动力学系统存在的参数摄动、外界干扰较强的非线性时变特征,提出 μ 控制策略控制制动管路压力,并进行参数摄动及外界干扰影响下的控制器性能仿真及整车道路试验。结果表明,采用 μ 控制算法的电控液压制动系统,在整车质量增加30%和制动盘-摩擦片摩擦因数减少30%两种工况下,整车期望加速度的稳态误差均控制在5%以内,稳定时间分别为1.7 s和1.4 s。

关键词: 智能汽车; 制动系统; 摄动; μ 控制算法; 设计

中图分类号: U463.52⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0369-08

Design and Experiment on Hydraulic Brake System of Intelligent Automobile Parallel Electric Control

YUAN Chaochun^{1,2} FAN Xinggen¹ YUAN Huiying³ SHEN Jie² CHEN Long¹ BEI Shaoyi⁴

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. University of Michigan-Dearborn, Dearborn MI 48128, USA

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

4. School of Automotive Engineering, Jiangsu Institute of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: In order to improve the performance and reliability of intelligent automatic braking system and the braking performance of traditional hydraulic braking system, on the basis of active collision avoidance system, a parallel electro-hydraulic anti-collision automatic braking system was designed based on the traditional hydraulic braking system, its mathematical model in the state of supercharging and decompression was also established. In view of the parameter perturbation and non-linear time-varying characteristics of vehicle dynamics, and also considered the vehicle in the process of vehicle quality changes and brake disc-brake pads friction coefficient changes, the μ control strategy was proposed to control the brake line pressure, an electronic control hydraulic brake controller based on μ control strategy and controller performance indicators were designed to simulate the performance of the controller under the influence of parameters perturbation and external disturbance, and the μ control strategy was compared with the H_∞ control strategy. The results showed that the electronic control hydraulic braking system with μ control algorithm can control the steady-state errors of expected accelerations of the whole vehicle within 5% under the conditions of 30% increase in the mass of the whole vehicle and 30% decrease in the friction coefficient of the brake disc - friction disc. The stabilization time was 1.7 s and 1.4 s, respectively, indicating the accuracy of the model was high, which solved the influence of parameter perturbation and sensor noise on the performance of controller in the electronic control hydraulic braking system.

Key words: intelligent vehicle; brake system; perturbation; μ control algorithm; design

收稿日期: 2016-11-04 修回日期: 2017-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51305167、U1564201)、江苏省高校自然科学研究重大项目(16KJA580002)、江苏大学青年骨干教师培养工程项目和江苏省“六大人才高峰”项目(2012-ZBZZ-029)

作者简介: 袁朝春(1978—),男,副教授,博士,主要从事汽车主动安全研究,E-mail: yuance_78@163.com

通信作者: 贝绍轶(1968—),男,教授,博士,主要从事汽车动力学研究,E-mail: bsy1968@126.com

引言

《中国制造 2025》明确指出：“至 2025 年，高度自动驾驶（简称 HA）智能汽车的市场占有率将达到 10% ~ 20%”。清华大学、吉林大学等国内外高校及科研院所研发了系列智能汽车，测试结果表明现有智能汽车技术可以适用于大部分的结构化和非结构化道路。王飞跃认为，国内智能汽车技术与国外技术的差距之一在于复杂工况下的智能汽车协调控制能力^[1]。

复杂工况下，行驶道路附着特性变化及车辆动力学特性参数摄动等情况经常出现^[2-3]，受行驶环境检测能力、控制方法及车联网基础设施建设滞后等原因影响，HA 级智能汽车将面临着很大的交通事故风险。自动制动系统是智能汽车的一个重要组成部分，良好的制动控制器能够在各种工况下都有较好的控制效果，现已经成为智能汽车研究领域热门方向，国内外关于智能汽车制动系统的研究，主要集中在主动制动系统控制算法的优化以及和车辆原有控制系统的集成等方面^[4-9]。现有制动控制系统所采用的控制理论主要有 PID、模糊控制理论等，这些理论的应用达到了一定的控制效果^[10-14]。但是，车辆参数变化、外界环境干扰等客观存在的因素会使系统超调量增多、调整时间过长等，甚至会导致系统的不稳定，严重影响鲁棒性能^[15-20]。无人化驾驶是智能汽车发展的最高水准，对制动系统的稳定鲁棒性和性能鲁棒性将有更高要求。

本文从制动系统结构和控制算法两方面出发，设计并联式电控液压制动执行机构，该执行机构可以在智能车液压制动系统失效时保持车辆制动能力，同时可以在紧急情况下辅助驾驶员进行制动避让障碍物；应用 μ 控制算法设计电控液压制动控制系统，在整车质量摄动和制动盘 - 摩擦片摩擦因数摄动的情况下保持优良的稳定鲁棒性和性能鲁棒性，以确保智能车的纵向安全性。

1 并联式电控液压制动系统设计及建模

1.1 并联式电控液压制动系统

为了显著提高智能汽车制动系统的可靠性，设计了一套并联式电控液压制动系统，此系统是将电控液压装置与传统液压制动系统并联作为辅助制动系统。系统结构如图 1 所示，主要包括电机泵、蓄能器、比例阀、压力传感器及 ECU 等主要模块。

ECU 是整个系统的控制核心，它会根据期望制动压力调节比例阀的开度，并负责控制电动机与接收压力传感器信号。电动机带动油泵将制动油壶中

的制动液泵出产生高压油，高压油经过单向阀给蓄能器充能，使蓄能器中始终充满高压制动油。当制动压力控制器发出增大制动力指令时，蓄能器中存储的高压油经过进液比例阀流入梭阀，进而使轮缸压力升高，产生制动力；当制动压力控制器发出减小制动力指令时，关闭进液比例阀，打开出液比例阀，制动管路中的制动液回流到制动油壶，从而降低制动力。

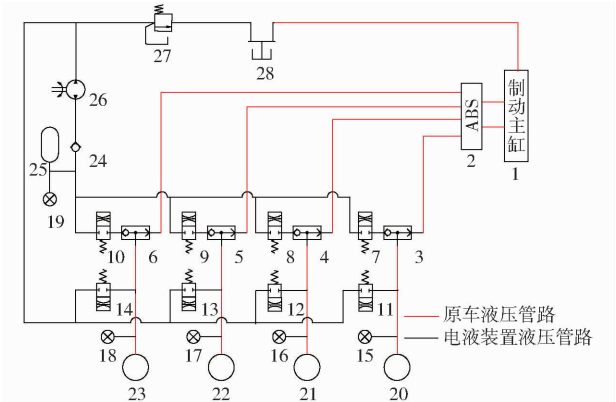


图 1 并联式电控液压制动系统结构图
Fig. 1 Structure diagram of parallel electric-hydraulic braking system

1.2 电控液压制动系统模型

针对设计的电控液压制动系统，通过实验及系统参数辨识方法建立系统增压及减压数学模型

$$\Delta \dot{P}_{increase} = \begin{cases} -80.7255(P_m - P)^{0.6325} & (D_j > 0.3986) \\ -764.7356D_j - 41.6032(P_m - P)^{0.6136} + 346.0610 & (-0.0112(P_m - P) + 0.3968 < D_j < 0.3986) \\ 0 & (D_j < -0.0112(P_m - P) + 0.3986) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{P}_{decline} = \begin{cases} -29.3763(P - P_0)^{12.133} & (D_c < 0.2 + 0.0163(P - P_0)) \\ -228.9565D_c - 34.112(P - P_0)^{1.0893} + 43.5683 & (0.0163(P - P_0) + 0.2 < D_c < 0.3 + 0.0163(P - P_0)) \\ 0 & (D_c > 0.0163(P - P_0) + 0.3) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\Delta \dot{P}_{increase}$ ——增压时比例阀阀口前后压力差的变化率

$\Delta \dot{P}_{decline}$ ——减压时比例阀阀口前后压力差的变化率

P_m ——蓄能器压力，MPa

P ——制动轮缸压力，MPa

P_0 ——大气压力,MPa
 D_j ——进液比例阀占空比,[0,1]
 D_c ——出液比例阀占空比,[0,1]

增压驱动电流 $I_{increase}$ 与进液比例阀占空比 D_j 之间的关系为

$$I_{increase} = 2.5961D_j + 0.073 \tag{3}$$

减压驱动电流 $I_{decline}$ 与出液比例阀占空比 D_c 之间的关系为

$$I_{decline} = 2.5829D_c + 0.0445 \tag{4}$$

如图2所示,当比例阀占空比为36%时,制动轮缸的实际压力与仿真结果误差小于1%,所建立的模型可以精确地表征电控液压制动系统特性。

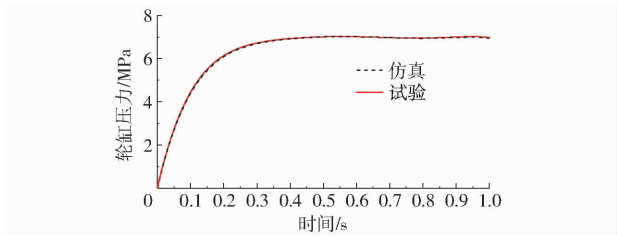


图2 进液比例阀部分打开时制动轮缸压力

Fig.2 Brake wheel cylinder pressure under partly opened proportional valve

2 自动制动系统及摄动分析

2.1 自动制动系统结构

由图3可知,在智能车辆行驶过程中,首先由自车传感器系统和车载毫米波雷达对车辆行驶状态及行驶环境进行感知,上位控制器依据安全距离模型判断车辆与前方车辆(或障碍物)的碰撞风险,并确定当前自车与前车(或障碍物)之间的安全距离,然后计算出当前车辆的期望加速度。下位控制器根据期望加速度,对车辆制动系统进行控制,保持车辆的安全距离,以达到智能汽车安全行驶的目的^[21]。

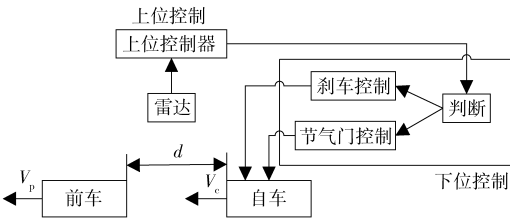


图3 汽车主动避撞控制系统结构

Fig.3 Structure of active collision avoidance control system

由图4可知,由主动避撞系统上位控制器得到期望加速度后,由车辆逆纵向动力学系统模型得到期望制动压力,然后由制动执行器模型得到实际制动压力,最后输出实际速度和加速度。本文的自动制动系统即在主动避撞系统基础上改进而来。

2.2 整车纵向标称动力学模型

由于本文仅考虑智能汽车直线行驶时防止与正

前方障碍物追尾碰撞工况,验证摄动影响下的电控液压制动系统的性能及可靠性,因此,把整车动力学模型简化成两轮模型,如图5所示。

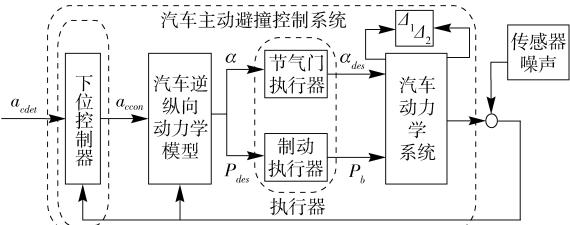


图4 主动避撞系统下位控制器

Fig.4 Lower controller of active collision avoidance system

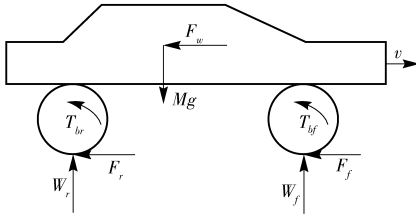


图5 整车动力学模型

Fig.5 Dynamic model of vehicle

假设前后轮滚动半径及转速相同,则制动状态下,得到整车纵向标称动力学方程为

$$\left(M + \frac{J_f + J_r}{r_r^2}\right)\dot{\omega} = -\frac{T_{bf} + T_{br}}{r_r^2} - \frac{Mgf}{r_r} - C_D A_a r_r \omega^2 \tag{5}$$

式中 M ——智能汽车总质量,kg

J_f ——前轮转动惯量,kg·m²

J_r ——后轮转动惯量,kg·m²

r_r ——车轮滚动半径,m

ω ——车轮转速,rad/s

T_{bf} ——前轮制动力矩,N·m

T_{br} ——后轮制动力矩,N·m

A_a ——车辆迎风面积,m²

C_D ——风阻系数 g ——重力加速度,m/s²

f ——滚动阻力摩擦因数

在汽车自动制动过程中,电控液压制动系统制动轮缸产生制动压力,通过活塞推动摩擦片压紧制动盘,从而产生制动摩擦力矩。制动盘受力情况,如图6所示。

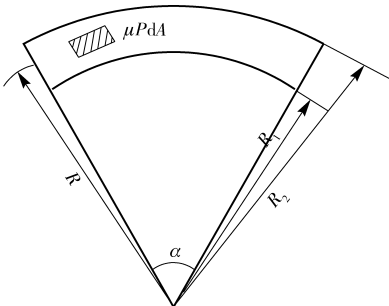


图6 制动盘受力分析

Fig.6 Force analysis of brake disc

(3)减少传感器噪声对系统的干扰,保证系统的性能鲁棒性。

3.2 控制器权函数选择

主动避撞控制系统需使用加速度和速度传感器来采集相关信号,所以产生的噪声干扰有加速度和速度传感器噪声。 η_1 、 η_2 分别表示加速度和速度传感器的单位噪声输入, W_1 、 W_2 为对应的权函数。根据噪声实际测量数据特点,取 $W_1 = \frac{0.12s + 0.032}{0.5s + 0.1}$ 、 $W_2 = \frac{0.37s + 0.13}{s + 1}$ 、 $W_a = \frac{2s + 0.7}{s + 0.03}$ 。取 $W_1 = \frac{0.12s + 0.032}{0.5s + 0.1}$ 是由于加速度传感器在低频处的测量噪声为 0.032 m/s^2 ,而在高频处为 0.12 m/s^2 。取 $W_2 = \frac{0.37s + 0.13}{s + 1}$ 由于车速传感器在低频处的测量噪声干扰为 0.13 m/s ,在高频处则达到 0.37 m/s 。经过不断试算,最终取 $W_a = \frac{2s + 0.7}{s + 0.03}$ 来控制加速度误差为 2% 。

4 试验及仿真

由于 H_∞ 鲁棒控制理论能够有效处理非结构不确定性问题,但是对于已知结构不确定性问题则存在较大的保守性。本文为了综合评估 μ 控制方法的鲁棒性,对于上述结构,在不改变输入输出的情况下,根据 H_∞ 鲁棒控制理论,设计了 H_∞ 控制器并将两种控制器进行分析对比。仿真及试验主要参数如表 1 所示,仿真工况如表 2 所示。

表 1 仿真、试验主要参数

Tab.1 Main parameters of simulation and test

参数	数值
整车质量 M/kg	1 250
车轮转动惯量 $J_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2.5
车轮滚动半径 r_r/m	0.3
重力加速度常数 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
摩擦因数 μ	0.34
空气阻力系数 C_D	0.379
汽车前挡风面积 A/m^2	1.8
滚动阻力摩擦因数 f	0.02
重心至前轴距离 a/m	1.1
重心至前轴距离 b/m	1.6

表 2 仿真工况

Tab.2 Simulation conditions

工况	初始车速 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	期望加速度 $a_{des}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	质量 M	摩擦因数 μ
工况 1	72	-0.5	增加 30%	不变
工况 2	72	-0.5	不变	减小 30%

4.1 仿真分析

针对 μ 控制器在质量增加 30% 和摩擦因数减少 30% 的工况下对系统进行仿真,并与 H_∞ 控制器进行对比,验证控制器鲁棒性。由文献[24]可知将期望加速度 a_{des} 的输出限制在 $-0.5 \sim 0.6 \text{ m/s}^2$ 之间,驾驶员与乘客的舒适性最佳,此工况称为最优加速度控制,所以本文选取期望加速度为 -0.5 m/s^2 的阶跃输入,各传感器的噪声假设为协方差为 0.01 的随机测量噪声。

图 8~10 显示了当质量增加 30% 时,在 μ 控制器和 H_∞ 控制器控制下系统的实际加速度、加速度误差和制动压力。可以看出, μ 控制器在 1.5 s 左右可以达到期望加速度,且能够将稳态误差控制在 5% 以内,延迟 μ 控制器在 1.8 s 达到期望制动压力,达到了较好的控制效果。而 H_∞ 控制器在 5 s 时,加速度为 -0.75 m/s^2 ,稳态误差接近 50%,达到期望制动加速度的能力较差。

图 11~13 显示了当制动盘-摩擦片摩擦因数减

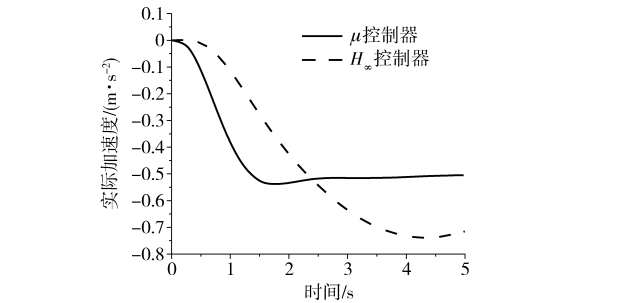


图 8 质量增加 30% 时,纵向加速度仿真曲线
Fig.8 Simulation curves of longitudinal acceleration

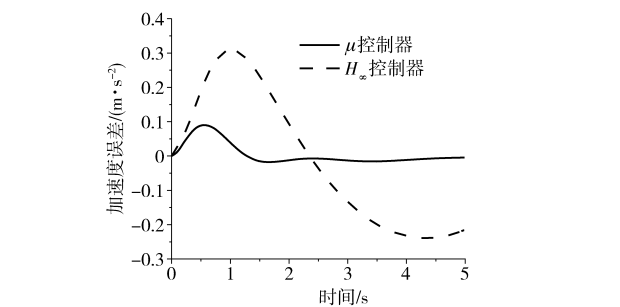


图 9 质量增加 30% 时,纵向加速度误差仿真曲线
Fig.9 Simulation curves of longitudinal acceleration error

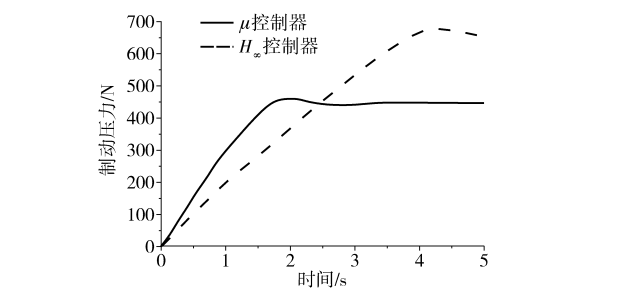


图 10 质量增加 30% 时,制动压力仿真曲线
Fig.10 Simulation curves of brake pressure

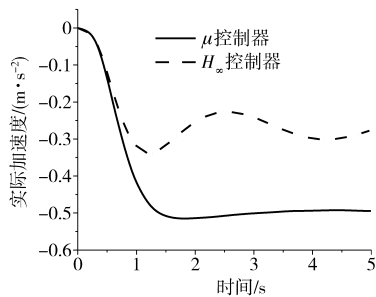


图 11 摩擦因数减小 30% 时,纵向加速度仿真曲线

Fig. 11 Simulation curves of longitudinal acceleration

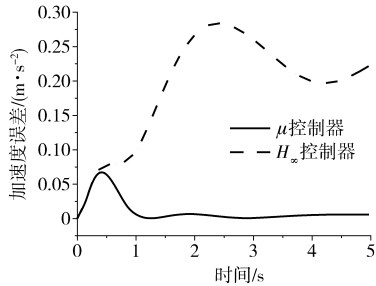


图 12 摩擦因数减小 30% 时,纵向加速度误差仿真曲线

Fig. 12 Simulation curves of longitudinal acceleration error

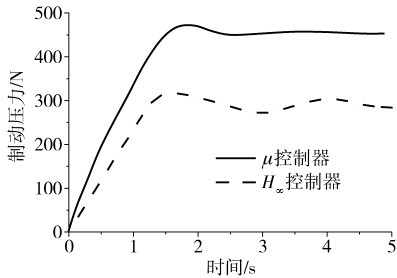


图 13 摩擦因数减小 30% 时,制动压力仿真曲线

Fig. 13 Simulation curves of brake pressure

小 30% 时, μ 控制器和 H_∞ 器控制下系统的实际加速度、加速度误差和制动压力。从仿真结果可以看出,在 5 s 内, H_∞ 控制器不能达到期望的加速度,而且制动压力有较大范围的波动。 H_∞ 控制器实际加速度和期望加速度误差较大,最大偏差达到 0.27 m/s^2 ,而 μ 控制器在 1.3 s 左右,系统达到期望的加速度,并使得相对误差稳定在一个较小的范围内。

4.2 试验验证

利用图 14 所示的实车试验平台验证整车对期望加速度的响应。通过更换不同的摩擦片材料改变摩擦因数,通过在实验车装质量块来模拟载荷变化。采用 ARK-3440F 型控制系统的工业工况机实现对整车制动系统的实时控制,根据实际情况计算期望的制动减速度,将控制信号输出给执行机构,控制比例阀的驱动电流达到期望减速度。

在路面附着系数为 0.8 的干燥沥青路面上以 72 km/h 的初速度进行试验。输入期望加速度为 -0.5 m/s^2 ,通过加速度传感器实时检测实

车加速度的响应情况。分别在质量增加 30% 和摩擦因数减小 30% 的 2 种工况下(表 3)对 μ 控制器和 H_∞ 控制器进行实车试验,实车试验结果如图 15 ~ 20 所示。

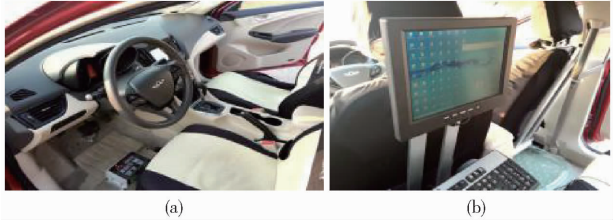


图 14 实车试验平台

Fig. 14 Vehicle test platforms

表 3 实车试验工况

Tab. 3 Actual vehicle test conditions

工况	初始车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	期望加 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	路面附着 系数	质量 M	摩擦 因数 μ
工况 1	72	-0.5	0.8	增加 30%	不变
工况 2	72	-0.5	0.8	不变	减小 30%

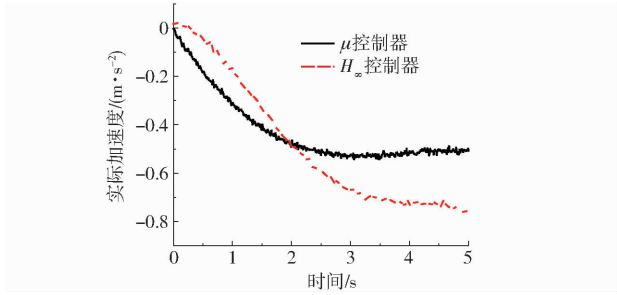


图 15 质量增加 30% ,实车加速度试验曲线

Fig. 15 Test curves of acceleration under 30% increase in mass

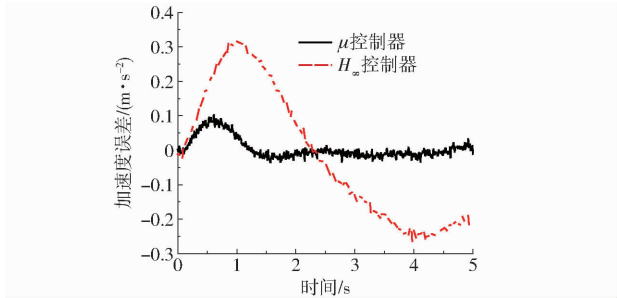


图 16 质量增加 30% ,实车加速度误差试验曲线

Fig. 16 Test curve of acceleration error under 30% increase in mass

从图 15 可看出,在实际质量增加 30% 的情况下, μ 控制器在 1.7 s 时,期望加速度达到 -0.5 m/s^2 ,并稳定在一定范围内。而在 H_∞ 控制器控制下,整车在 5 s 时仍未达到期望的加速度,且超调量达到 0.26 m/s^2 。从图 16 可以看出,当质量增加 30% 时, μ 控制器在 2 s 左右时加速度误差就趋于 0 并保持稳定,而 H_∞ 控制器则波动较大。从图 17 可以看出,

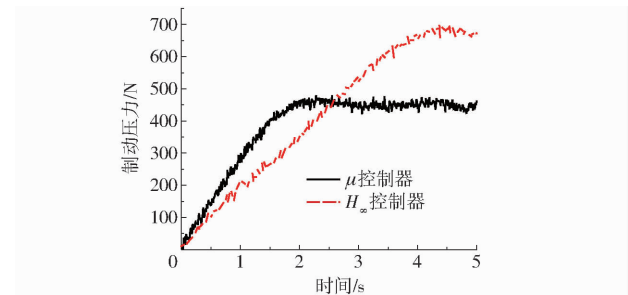


图 17 质量增加 30%,制动压力试验曲线
Fig. 17 Test curves of braking pressure under 30% increase in mass

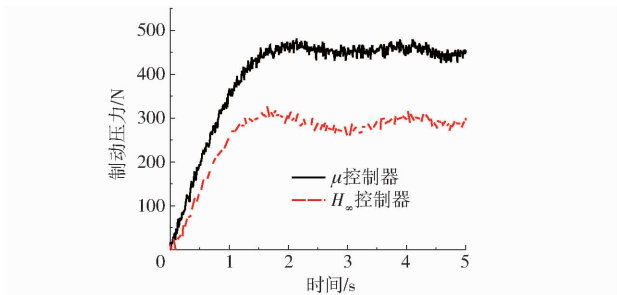


图 20 摩擦因数减小 30%,制动压力试验曲线
Fig. 20 Test curves of braking pressure under 30% decrease in friction coefficient

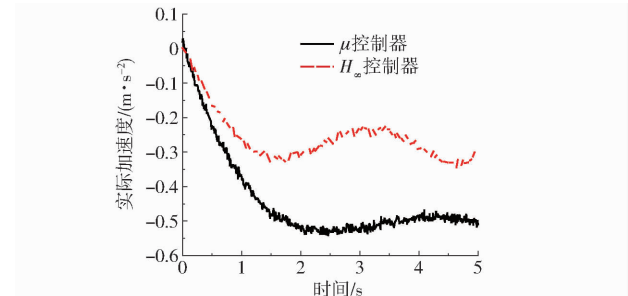


图 18 摩擦因数减小 30%,实车加速度响应曲线
Fig. 18 Test curves of acceleration under 30% decrease in friction coefficient

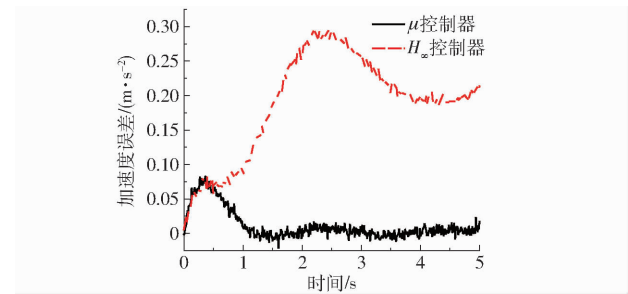


图 19 摩擦因数减小 30%,实车加速度误差试验曲线
Fig. 19 Test curves of acceleration error under 30% decrease in friction coefficient

μ 控制器在 2.1 s 时达到期望制动压力,而 H_{∞} 控制器则明显偏离期望制动压力。由图 15~17 可得,在实际质量存在大范围摄动时, μ 控制器具有较好的鲁棒性和较好的制动性能。由图 18 可知,当摩擦因数减小 30% 时,在 H_{∞} 控制器的控制下,整车无法达到

期望加速度,最大制动加速度仅达到 -0.35 m/s^2 ,有明显的制动力不足的情况,严重影响了实际安全。而在 μ 控制器控制下,在 1.4 s 时,实车达到期望加速度,并且将稳态误差控制在 5% 以内。从图 19 可以看出,当摩擦因数减小 30% 时, μ 控制器在 2 s 后加速度误差就趋于 0 并保持稳定,而 H_{∞} 控制器则波动很大。从图 20 可以看出, μ 控制器在 2 s 左右时就达到期望的制动压力,而 H_{∞} 控制器则没有此效果,说明 μ 控制器在摩擦因数变化下仍有较好的控制效果。

5 结论

(1) 为提高智能汽车制动系统的性能及可靠性,设计了并联式电控液压主动防碰撞自动制动系统,并建立其在增压和减压状态下的数学模型,在比例阀占空比为 36% 时,仿真及试验结果误差小于 1%,表明所建模型的精确性。

(2) 采用 μ 分析与综合方法中的线性分式变换及系统关联重构等手段,解决电控液压制动系统中存在的参数摄动、传感器噪声对控制器性能的影响,试验结果表明,采用 μ 控制算法的电控液压制动系统,在整车质量增加 30% 和制动盘-摩擦片摩擦因数减少 30% 两种工况下,整车期望加速度的稳态误差均控制在 5% 以内,稳定时间分别为 1.7 s 和 1.4 s。

参 考 文 献

- 2015 中国智能未来挑战赛全纪录. http://www.its114.com/html/2015/telematics_1118160968.html.
- 解瑞春. 基于信息融合技术的车辆行驶状态估计算法研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2015.
XIE Ruichun. Research on vehicle driving state estimation algorithm based on information fusion technology[D]. Jinzhou:Liaoning University of Technology, 2015. (in Chinese)
- GUSTAFSSON F. Estimation and change detection of tire - road friction using the wheel slip[C]//IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, 1996:99 - 104.
- 宋晓琳,冯广刚,杨济匡. 汽车主动碰撞系统的发展现状及趋势[J]. 汽车工程,2008,30(2):285 - 289.
SONG Xiaolin, FENG Guanggang, YANG Jikuang. Present status and trend of automotive active collision avoidance system [J]. Automotive Engineering, 2008,30(2): 285 - 289. (in Chinese)
- 龙伟,魏玉聪. 基于毫米波雷达的高速弯道扇形预警模型[J]. 四川大学学报:工程科学版,2015,47(3):150 - 153.

- LONG Wei, WEI Yucong. An early warning model of high-speed curve sector based on millimeter-wave radar [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(3): 150–153. (in Chinese)
- 6 刘志新, 张大卫, 李幼德. 基于滑转率的四轮驱动汽车防滑模糊控制仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(12): 21–24.
LIU Zhixin, ZHANG Dawei, LI Youde. Simulation of non-slip fuzzy control for four-wheel-drive vehicle based on slip ratio [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 21–24. (in Chinese)
- 7 刘学军, 何仁. 电磁-液压复合防抱死制动系统滑模控制[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 1–7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140501&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.001.
LIU Xuejun, HE Ren. Sliding mode control of antilock braking system with electromagnetic-hydraulic compound [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 1–7. (in Chinese)
- 8 MOON S, MOON I, YI K. Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(4): 442–455.
- 9 LU X Y, TAN H S, DAN E, et al. Nonlinear longitudinal controller development and real-time implementation [R]. Transportation Studies, UC Brfleeley, 2000.
- 10 YI K, HONG J, KWON Y D. A vehicle control algorithm for stop-and-go cruise control [C] // 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2001: 478–482.
- 11 CHOI S B, DEVLIN P. Throttle and brake combined control for intelligent vehicle highway systems [M] // Systems & Issues in Its, SAE Special Publications, 1995.
- 12 CONNOLLY T R, HEDRICK J K. Longitudinal transition maneuvers in an automated highway system [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1996, 121(3): 471–478.
- 13 GERDES J C, HEDRICK J K. Brake system requirements for platooning on an automated highway [C] // Proceedings of the 1995, 1995: 165–169.
- 14 胡春花, 何仁, 李楠. 混联式 HEV 能量控制系统鲁棒控制器设计 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 62–66.
HU Chunhua, HE Ren, LI Nan. Robust controller design for hybrid HEV energy control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 62–66. (in Chinese)
- 15 侯德藻, 高峰, 李克强, 等. 应用于汽车主动碰撞系统的车辆纵向动力学模型 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(2): 258–261.
HOU Dezao, GAO Feng, LI Keqiang, et al. Vehicle longitudinal dynamic model applied to vehicle active collision avoidance system [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(2): 258–261. (in Chinese)
- 16 CELENTANO G, IERVOLINO R, PORRECA S, et al. Car brake system modeling for longitudinal control design [C] // Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003: 25–30.
- 17 MILANÉS V, GONZÁLEZ C, NARANJO J E, et al. Electro-hydraulic braking system for autonomous vehicles [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(1): 89–95.
- 18 LIMEBEER D J N, KASENALLY E. H_{∞} optimal control of a synchronous turbo-generator [C] // IEEE Conference on Decision and Control, 1987: 62–65.
- 19 皮大伟, 陈南, 张丙军. 基于主动制动的车辆稳定性系统最优控制策略 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 1–6.
PI Dawei, CHEN Nan, ZHANG Bingjun. Optimal control strategy of vehicle stability based on active braking [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 1–6. (in Chinese)
- 20 丁永前, 王致情, 林相泽, 等. 自主跟随车辆航向控制系统 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 8–13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150102&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.002.
DING Yongqian, WANG Zhiqing, LIN Xiangze, et al. Autonomous follow the vehicle heading control system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 8–13. (in Chinese)
- 21 宋晓琳, 冯广刚, 杨济匡. 汽车主动碰撞系统的发展现状及趋势 [J]. 汽车工程, 2008, 30(4): 285–290.
SONG Xiaolin, FENG Guanggang, YANG Jikuang. Present status and trends of vehicle active collision avoidance system [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(4): 285–290. (in Chinese)
- 22 王兆. 乘用车制动标准法规技术对比分析与研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
WANG Zhao. Comparison and analysis of technical regulations of passenger vehicle braking standards [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 23 朱攀. 车辆制动摩擦材料关键特性的研究及检测方法 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
ZHU Pan. Study on the key characteristics of vehicle braking friction material and its detection method [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 24 马国成. 车辆自适应巡航跟随控制技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
MA Guocheng. Vehicle adaptive cruise following control technology [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)