

电控空气悬架车高调节与整车姿态控制研究^{*}

汪少华¹ 窦辉¹ 孙晓强¹ 殷春芳²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对电控空气悬架在车高调节过程中存在的过充、过放以及振荡等不良现象,提出一种能够对气体质量流量进行自适应调节的神经网络PID控制方法。根据车辆系统动力学和变质量充放气系统热力学理论,建立了电控空气悬架车高调节数学模型,设计了车高调节BP神经网络PID控制器,并对控制器的实际性能进行了仿真验证。在此基础上,为了进一步防止车高调节过程中因四角高度调节不同步而引起的整车姿态失稳现象,基于模糊控制算法对系统局部控制量进行了修正,从而形成整车姿态模糊控制器。最后,基于D2P快速开发平台搭建了电控空气悬架车高调节控制系统,进行了整车台架试验。试验结果表明,所设计的控制系统不仅能够实现车身高度的有效调节,同时还能抑制车高调节过程中的整车姿态变化。

关键词: 电控空气悬架 车高调节 姿态控制 神经网络PID 试验

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0335-08

Vehicle Height Adjustment and Attitude Control of Electronically Controlled Air Suspension

Wang Shaohua¹ Dou Hui¹ Sun Xiaoqiang¹ Yin Chunfang²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electrical & Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: This paper presented the design and verification of a vehicle height adjustment and attitude controller for electronically controlled air suspension. For the undesirable phenomenon such as over-charge, over-discharge and oscillation during the vehicle height adjustment process of the electronically controlled air suspension, a neural network PID control method to regulate the gas mass flow rate adaptively was proposed. According to the theory of the vehicle system dynamics and the thermodynamic theory of variable mass charge/discharge gas system, a vehicle height adjustment mathematical model for the electronically controlled air suspension was established. A BP neural network PID controller for vehicle height adjustment was designed and its actual control performance was verified by simulation. During the vehicle height adjustment process, the non-synchronous height adjustment of the four corners would result in the vehicle attitude instability phenomenon. In order to prevent the instability phenomenon, the system local control qualities were revised by fuzzy control algorithm to form the vehicle attitude fuzzy controller. Finally, the vehicle height adjustment control system was realized by D2P rapid development platform to perform vehicle bench experiments. The test results showed that the control system could regulate the vehicle height effectively and restrain the vehicle attitude change during the vehicle height adjustment process.

Key words: Electronically controlled air suspension Vehicle height adjustment Attitude control
Neural network PID Test

收稿日期: 2014-12-11 修回日期: 2015-01-13

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51375212)、江苏省高校自然科学研究资助项目(12KJB580001)、中国博士后科学基金资助项目(2014M551518)、江苏省“六大人才高峰”资助项目(2013-GDZB-001)和江苏大学高级专业人才培养基金资助项目(14JDC067)

作者简介: 汪少华, 副教授, 博士, 主要从事车辆动态性能仿真与控制研究, E-mail: 13514462@qq.com

引言

电控空气悬架 (Electronically controlled air suspension, ECAS) 是在传统被动空气悬架的基础上增加控制单元,从而可以实现悬架系统刚度、阻尼以及车身高度的主动调节,对于提高车辆在实际行驶过程中的乘坐舒适性、操纵稳定性以及燃油经济性都具有重要意义,是未来车辆悬架领域发展的重要方向之一^[1-5]。

车身高度调节是 ECAS 的特色功能之一,系统能够根据车辆实际行驶工况或驾驶员指令自动对空气弹簧内的气体质量进行调节,从而实现车身高度的自适应调整^[6-7]。目前,ECAS 车高调节主要是通过通过对相应电磁阀的通断状态以及状态持续时间进行控制,但由于系统在车高调节过程中必然受到减振器阻尼力的影响,因此,直接开环控制不仅难以实现车身高度的精确控制,同时还会导致系统出现过充、过放以及高度目标值附近的振荡现象,从而严重影响车辆动态性能^[8]。

随着现代控制理论的快速发展,一些先进控制技术已被应用于 ECAS 的车高调节控制中^[9-11]。本文在上述研究的基础上,提出一种基于神经网络 PID 的电控空气悬架车高调节控制方法,通过自适应能力较强的神经网络进行 PID 控制器结构参数的动态调整,从而实现车身高度的精确控制。同时,为防止车高调节过程中因四角调节不同步而引起的整车姿态失稳现象,设计整车姿态模糊控制器。最后,基于 D2P 快速开发平台进行 ECAS 车高控制系统的实际实现,并通过台架试验验证系统的实际控制性能。

1 车高调节系统数学建模

所研究的 ECAS 车高调节系统如图 1 所示,系统主要包括储气罐、电磁阀(充气、放气)、空气弹簧电磁阀以及空气弹簧等,车高调节系统通过空气弹簧与空气悬架建立直接联系,进而通过空气悬架影响车身高度。

由图 1 可以看出,ECAS 车高调节是通过通过对空气弹簧进行充放气实现的,当车身高度需要提升时,充气电磁阀和空气弹簧电磁阀打开,来自储气罐的高压气体进入空气弹簧内,空气弹簧体积增大,进而车身高度上升;当车身高度需要降低时,放气电磁阀和空气弹簧电磁阀打开,空气弹簧内的气体直接排入大气,空气弹簧体积减小,车身高度下降。

为便于研究,在对 ECAS 车高调节系统进行建模时,做如下假设^[12]:①气体为理想气体,忽略其流

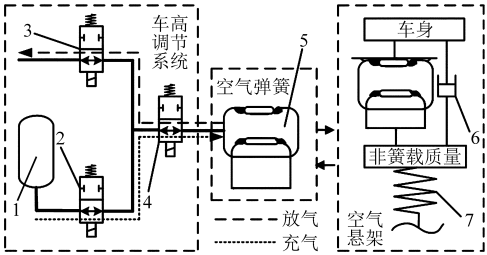


图 1 电控空气悬架车高调节系统

Fig. 1 Vehicle height adjustment system for ECAS

1. 储气罐 2. 充气电磁阀 3. 放气电磁阀 4. 空气弹簧电磁阀
5. 空气弹簧 6. 减振器 7. 轮胎

动过程中产生的动能,气体温度保持不变。②作为系统的高压源和低压源,储气罐和大气环境的压力保持恒定。③各电磁阀动态特性相同,并将其简化为一薄壁小孔。④空气弹簧为圆柱形活塞座膜式空气弹簧,其有效面积在工作行程内的变化可以忽略。

结合上述假设,得管路和空气弹簧在车高调节过程中的动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{p}_p v_p = kRT(q_1 - q_2) \\ \dot{p}_{as} v_{as} = kRTq_{as} - k p_{as} \dot{v}_{as} \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 p_p ——管路内气体压力 v_p ——管路体积
 k ——等熵指数(空气取 1.4)
 R ——气体常数 T ——气体热力学温度
 q_1, q_2 ——流入管路和流出管路的气体质量流量
 p_{as} ——空气弹簧内气体压力
 v_{as} ——空气弹簧体积
 q_{as} ——流入(正值)或者流出(负值)空气弹簧的气体质量流量

根据气体通过薄壁小孔的流动方程可得气体质量流量为^[13]

$$q = \begin{cases} 0.082 \, 2 C A_0 \frac{1}{\sqrt{T}} \sqrt{p_d (p_u - p_d)} & (p_d / p_u \geq b) \\ 0.040 \, 4 C A_0 \frac{p_u}{\sqrt{T}} & (p_d / p_u < b) \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 C ——流量系数 A_0 ——电磁阀名义截面积
 p_u ——管路上游气压
 p_d ——管路下游气压 b ——压力比

显然,当系统向空气弹簧充气时, q_1 的上游为储气罐,下游为管路, q_2 的上游为管路,下游为空气弹簧;当空气弹簧需要放气时, q_1 的上游为空气弹簧,下游为管路, q_2 的上游为管路,下游为大气环境。同理,可以得出车高调节过程中 q_{as} 的上下游。

忽略空气弹簧有效面积在工作行程内的变化,则空气弹簧体积变化率可以表示为

$$\begin{cases} \dot{v}_{as} = A_{as}(z_{as0} + z_{as}) \\ \dot{z}_{as} = v_{as} \end{cases} \quad (3)$$

式中 A_{as} ——空气弹簧的有效面积
 z_{as0} ——空气弹簧设计高度
 z_{as} ——空气弹簧位移

则空气弹簧动力学方程可以进一步表示为

$$\dot{p}_{as} A_{as}(z_{as0} + z_{as}) = kRTq_{as} - kp_{as} A_{as} \dot{z}_{as} \quad (4)$$

同时,车高调节过程中的空气悬架模型为^[14-15]

$$\begin{cases} p_{as} A_{as} - \dot{c} z_{as} - m_s g = m_s \ddot{z}_2 \\ k_t(z_0 - z_1) - p_{as} A_{as} + \dot{c} z_{as} = m_u \ddot{z}_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中 c ——减振器阻尼系数 m_s ——车身质量
 z_2 ——车身垂直位移 k_t ——轮胎刚度
 z_0 ——路面不平度输入
 z_1 ——非簧载质量垂直位移
 m_u ——非簧载质量

2 车高调节神经网络 PID 控制

针对 ECAS 车高调节系统呈现出明显的时变、非线性等复杂动态特征,常规 PID 控制器由于控制参数自适应能力较弱,因而难以达到理想的控制效果。神经网络具有自适应和自学习能力,为此,将神经网络(Neural network, NN)与 PID 控制相结合,利用神经网络对 PID 控制参数进行实时最优调整,从而提高系统控制性能。

2.1 控制器设计

BP 神经网络具有无限逼近非线性函数的能力,且结构和训练算法简单明确。基于 BP 神经网络的 PID 控制器结构如图 2 所示^[16],控制器由 2 部分构成,即经典 PID 控制器和 BP 神经网络,其中,PID 控制器直接对被控对象进行闭环控制,而 BP 神经网络则根据系统运行状态对 PID 控制器的结构参数进行动态调整,以期实现系统控制性能的最优。

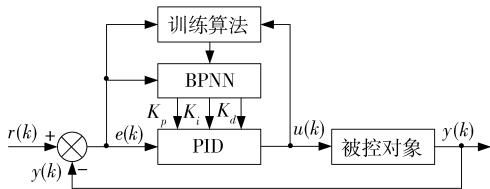


图 2 BP 神经网络 PID 控制器

Fig. 2 BP neural network PID controller

ECAS 车高调节神经网络 PID 控制器以参考车身高度与实际车身高度的误差作为目标函数,然后基于该目标函数对 BP 神经网络的连接权值进行修正,进而调节 PID 控制器的结构参数,最终通过 PID 控制器作用于车高调节系统。

BP 神经网络包括输入层、隐含层以及输出层,其网络结构如图 3 所示。结合所研究的车高调节系

统,输入层包含 2 个节点,分别为 $e(k)$ 和 $\dot{e}(k)$,隐含层为 5 个节点,输出层为 3 个节点,即 PID 控制器的 3 个结构参数。

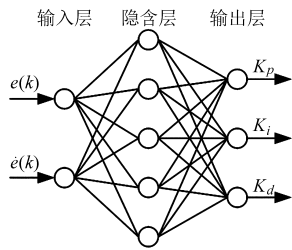


图 3 BP 神经网络结构

Fig. 3 BP neural network structure

PID 控制器采用增量式控制算法,因此,控制器的输出应表示为^[17]

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6)$$

神经网络隐含层的输入输出分别为

$$\begin{cases} \text{net}_j(k) = \sum_{i=1}^2 w_{ij}(k) o_i(k) \\ \theta_j(k) = f[\text{net}_j(k)] \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, 5) \quad (7)$$

式中 $o_i(k)$ —— $e(k)$ 和 $\dot{e}(k)$

$w_{ij}(k)$ ——隐含层连接权值

f ——正负对称的 sigmoid 函数

为防止系统因频繁控制引起电磁阀通断状态在短时间内多次切换,从而严重影响电磁阀的使用寿命,根据实际高度控制要求,对位置跟踪偏差设置了死区,即

$$e(k) = \begin{cases} 0 & (|e(k)| \leq |e_0|) \\ e(k) & (|e(k)| > |e_0|) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $e(k)$ ——位置跟踪误差

e_0 ——误差阈值

神经网络输出层的输入输出分别为

$$\begin{cases} \text{net}_n(k) = \sum_{i=1}^5 w_{in}(k) \theta_i(k) \\ \theta_n(k) = g[\text{net}_n(k)] \end{cases} \quad (n=1, 2, 3) \quad (9)$$

式中 $w_{in}(k)$ ——隐含层连接权值

g ——非负对称的 sigmoid 函数

取 BP 神经网络的准则函数为

$$E(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}(e(k))^2 \quad (10)$$

式中 $r(k)$ ——参考车高(目标值)

$y(k)$ ——实际车高

网络权值的修正算法采用梯度下降法实现,即按 $E(k)$ 对权值系数的负梯度方向进行搜索调整,并

附加使搜索快速收敛至全局最小的惯性项,即^[18]

$$w_i(k+1)=w_i(k)+\Delta w_i(k+1)$$

(11)

$$\Delta w_i(k+1)=-\eta(k)\frac{\partial E(k)}{\partial w_i(k)}+\alpha\Delta w_i(k)$$

(12)

式中 η ——学习速率 α ——惯性系数

输出层网络权值的修正计算方法如下^[19]

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w_{in}(k)}=\frac{\partial E(k)}{\partial e(k)}\frac{\partial e(k)}{\partial u(k)}\frac{\partial u(k)}{\partial \theta_n(k)}\frac{\partial \theta_n(k)}{\partial \text{net}_n(k)}\frac{\partial \text{net}_n(k)}{\partial w_{in}(k)}$$

(13)

式中,由于 $\frac{\partial e(k)}{\partial u(k)}$ 未知,可采用近似的符号

$$\text{sgn}\left(\frac{\partial e(k)}{\partial u(k)}\right)$$

进行替代。

根据增量式 PID 控制算法的表达式可得

$$\begin{cases} \frac{\partial u(k)}{\partial \theta_1(k)}=e(k)-e(k-1) \\ \frac{\partial u(k)}{\partial \theta_2(k)}=e(k) \\ \frac{\partial u(k)}{\partial \theta_3(k)}=e(k)-2e(k-1)+e(k-2) \end{cases}$$

(14)

式(14)中其余各项的计算结果分别为

$$\begin{cases} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)}=e(k) \\ \frac{\partial \theta_n(k)}{\partial \text{net}_n(k)}=g[\text{net}_n(k)] \\ \frac{\partial \text{net}_n(k)}{\partial w_{in}(k)}=\theta_j(k) \end{cases}$$

(15)

综上,令 $\delta_{in}=-\frac{\partial E(k)}{\partial w_{in}(k)}$,且其具体表达式为

$$\delta_{in}=-e(k)\text{sgn}\left(\frac{\partial e(k)}{\partial u(k)}\right)\frac{\partial u(k)}{\partial \theta_n(k)}g[\text{net}_n(k)]\theta_j(k)$$

(16)

则,输出层网络权值的修正计算公式为

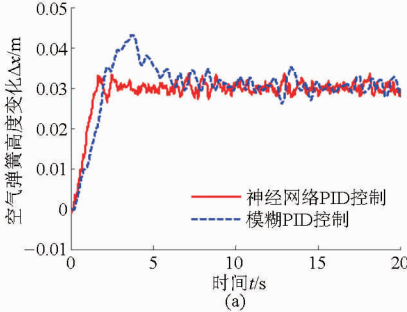
$$\Delta w_{in}(k+1)=\eta(k)\delta_{in}+\alpha\Delta w_{in}(k)$$

(17)

同理,可得隐含层加权系统的修正计算公式为

$$\Delta w_{ij}(k+1)=\eta(k)\delta_{ij}+\alpha\Delta w_{ij}(k)$$

(18)



2.2 控制性能仿真

基于 Matlab/Simulink 搭建基于 BP 神经网络 PID 的 ECAS 车高调节控制系统,对系统控制性能进行仿真分析和验证。为了对比控制器的控制效果及控制精度,同时设计了车高调节模糊 PID 控制器。

分别进行了车身高度上升和降低两个过程的仿真,调节高度设定为 30 mm,仿真时间设置为 20 s,其余仿真参数如表 1 所示,仿真结果如图 4 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters			
参数	数值	参数	数值
储气罐气体压力/MPa	0.8	绝热指数	1.4
空气弹簧有效面积/m ²	0.009	车身质量/kg	382
电磁阀截面积/mm ²	4	误差阈值/mm	2
气体热力学温度/K	273	学习速率 η	0.25
阻尼系数/(N·s·m ⁻¹)	3 500	惯性系数 α	0.095

仿真时,随机路面不平度采用有理函数进行拟合,具体拟合公式为^[20]

$$\dot{z}_0(t)=-0.111[vz_0(t)+40\sqrt{G_q(n_0)}vw(t)]$$

(19)

式中 $z_0(t)$ ——路面不平度时域输入

v ——车速

$G_q(n_0)$ ——路面不平度系数

$w(t)$ ——均值为零的高斯白噪声

由图 4 可以明显看出,相对于模糊 PID 控制器对设计者经验要求较高,模糊规则不易确定,且规则一旦确定后,控制器的结构不能调整,自适应能力较弱,神经网络 PID 控制器能够利用其强大的自适应能力在线进行 PID 控制器参数的整定,对控制器最初的结构或控制规则依赖度较低,从而能够迅速将车身高度调节至目标值,大幅度降低高度超调量,有效改善电控空气悬架车高调节的控制精度和控制品质。

3 整车姿态模糊控制

对于 ECAS 整车,系统需要同时对四组互相并

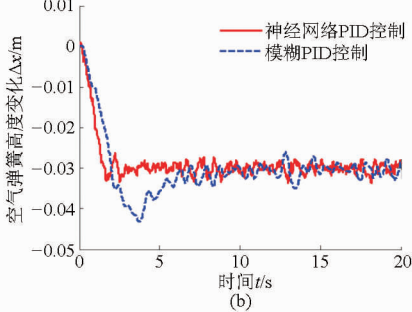


图 4 车高调节仿真结果

Fig.4 Simulation results of vehicle height adjustment

(a) 车身提升 (b) 车身降低

联的空气弹簧进行充放气,从而实现车身高度的整体调节。由于前后空气弹簧的系统参数存在差异(如管路长度、弹簧体积等)以及整车簧载质量分布不均且随机变化等因素,ECAS 在车高调节过程中,必然会出现因四角车高调节不同步而引起的整车姿态失稳现象。基于此,考虑进行整车姿态控制器设计,通过监测车高调节过程中的整车姿态变化,对系统相应局部控制量进行修正,从而抑制车身俯仰和侧倾,保证车高调节过程中的整车姿态平稳。整车车高与姿态调节控制系统如图 5 所示。

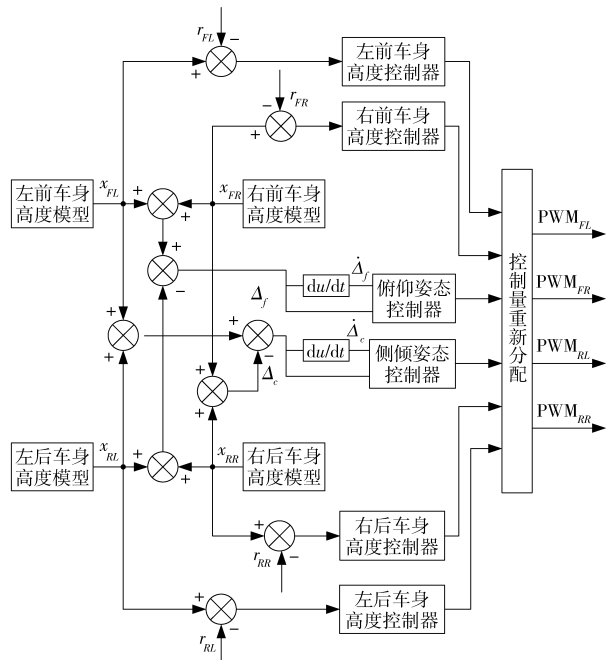


图 5 整车车高与姿态调节控制系统

Fig. 5 Control system of vehicle height and attitude adjustment

图中, x_{FL} 、 x_{FR} 、 x_{RL} 以及 x_{RR} 分别为车辆左前、右前、左后、右后处的实际车身高度, r_{FL} 、 r_{FR} 、 r_{RL} 以及 r_{RR} 分别为相应的参考目标值, Δ_f 和 $\dot{\Delta}_f$ 为车身俯仰偏差及其变化率, Δ_c 和 $\dot{\Delta}_c$ 为车身侧倾偏差及其变化率, 其中, 车身俯仰偏差及侧倾偏差为

$$\begin{cases} \Delta_f = x_{FL} + x_{FR} - (x_{RL} + x_{RR}) \\ \Delta_c = x_{FL} + x_{RL} - (x_{FR} + x_{RR}) \end{cases} \quad (20)$$

3.1 控制器设计

整车姿态控制精度要求不高,没有固定的参考输出轨迹,但控制策略清晰明确,模糊控制器的控制规则易于确定,因此,考虑采用模糊控制算法进行整车姿态控制器的设计。

由于车高调节神经网络 PID 控制器的输出为空气质量流量,而在实际车高调节系统中,电磁阀只能在开关状态之间进行离散切换,因此,为实现电磁阀开关状态的控制,需要基于脉宽调制控制算法

(PWM)将空气质量流量进一步转换为电磁阀开关状态的占空比 P ,具体转换方法为

$$P = \begin{cases} 1 & (|q_c| \geq q_a) \\ q_c/q_a & (|q_c| < q_a) \\ 0 & (q_c = 0) \end{cases} \quad (21)$$

式中 q_c ——车高调节控制器输出的进入或流出空气弹簧的空气质量流量与单位控制周期的乘积

q_a ——全开状态下流经电磁阀的的空气质量流量与单位控制周期的乘积

图 6 为整车姿态模糊控制器结构示意图,控制器的输入分别为车身俯仰偏差 Δ_f 及其变化率 $\dot{\Delta}_f$ 以及车身侧倾偏差 Δ_c 及其变化率 $\dot{\Delta}_c$,输出为姿态参数修正值 ΔP_x 和 ΔP_y ,随后将姿态参数修正值传输给电磁阀 PWM 决策模块,基于该模块对四角各空气弹簧开关状态的占空比进行修正。

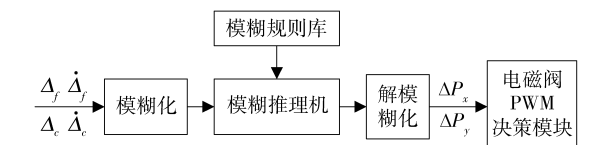


图 6 整车姿态模糊控制器

Fig. 6 Vehicle attitude fuzzy controller

对相应的车身姿态偏差量进行模糊化,然后针对姿态参数修正值 ΔP_x 和 ΔP_y 分别设计模糊控制规则。输入量采用 5 个模糊语言来描述,即 {NL(负大)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PL(正大)},其中,车身俯仰偏差及侧倾偏差的基本论域均为 $[-0.1, 0.1]$,模糊论域为 $[-30, 30]$;偏差变化率的基本论域为 $[-10, 10]$,模糊论域为 $[-30, 30]$ 。输出量为电磁阀开关状态占空比的修正量,均为正值,因此,用以描述的 5 个模糊语言分别为 {SS(很小)、S(小)、M(中等)、L(大)、LL(很大)},基本论域为 $[0, 1]$,模糊论域为 $[0, 10]$ 。输入和输出量的隶属度函数均采用高斯型,解模糊采用重心法。

基于所定义的输入量、输出量以及模糊语言制定系统控制规则表,俯仰与侧倾方向修正量控制规则表相同,如表 2 所示。

表 2 模糊控制规则
Tab. 2 Fuzzy control rules

$\dot{\Delta}_f(\dot{\Delta}_c)$	$\Delta_f(\Delta_c)$				
	NL	NS	ZE	PS	PL
NL	SS	SS	SS	S	M
NS	SS	SS	S	M	L
ZE	SS	S	M	L	LL
PS	S	M	L	LL	LL
PL	M	L	LL	LL	LL

根据模糊控制器的输出,对 ECAS 四角车高调节局部控制量进行修正。由于修正原理相同,这里仅对车身提升过程中,当 $\Delta_f > 0$ (前轮的平均高度变化比后轮大)以及 $\Delta_c > 0$ (左轮的平均高度变化比右轮大)时的情况进行分析。为抑制车身俯仰和侧倾,此时,后悬空气弹簧应保持正常充气状态,占空比为最大值,前悬空气弹簧应适当减少空气流量,即将占空比减小 ΔP_x 。同理,右侧空气弹簧电磁阀占空比应保持最大值,而左侧占空比应减少 ΔP_y 。因此,修正后的各空气弹簧电磁阀开关状态占空比应为

$$\begin{cases} P_{FLc} = P_{FL} - \Delta P_x - \Delta P_y \\ P_{FRc} = P_{FR} - \Delta P_x \\ P_{RLc} = P_{RL} - \Delta P_y \\ P_{RRc} = P_{RR} \end{cases} \quad (22)$$

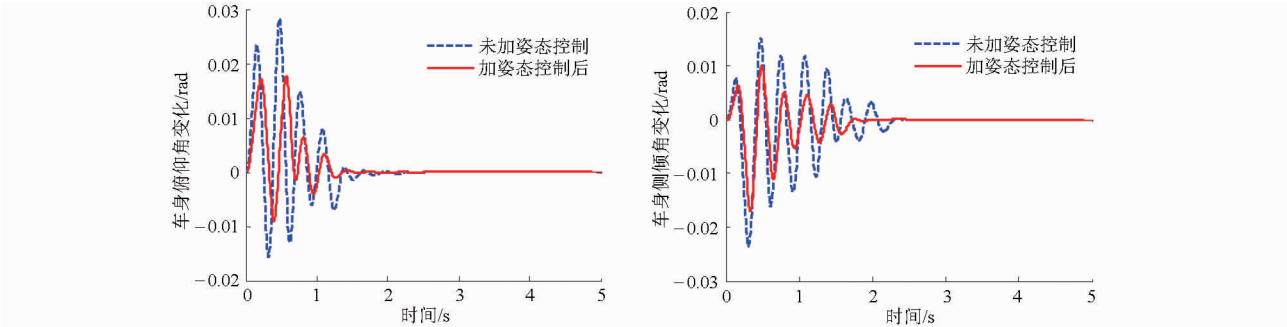


图 7 车身提升过程中的姿态变化

Fig. 7 Attitude change in body rise process

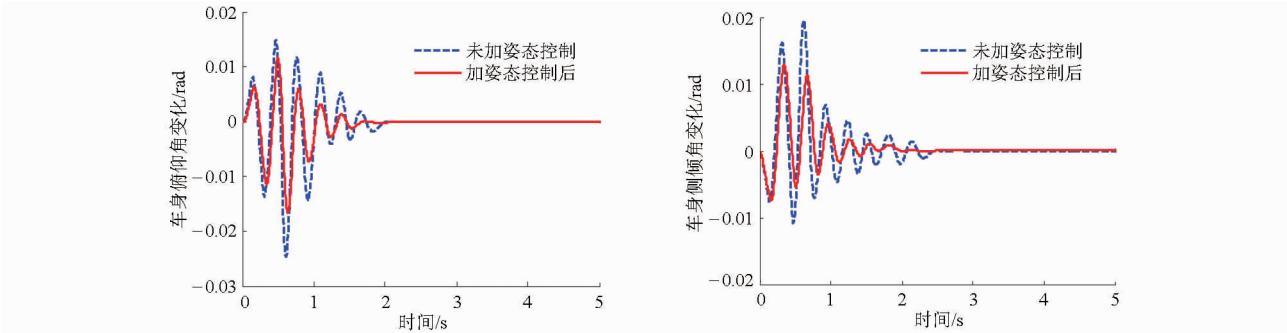


图 8 车身降低过程中的姿态变化

Fig. 8 Attitude change in body decline process

4 高度控制系统台架试验

为进一步验证所设计的 ECAS 车高控制系统的可靠性和有效性,在整车台架上安装了某型电控空气悬架系统。根据前文所述,进行车高及整车姿态控制器设计,然后利用 ECU 快速开发平台进行实现,最后将其与整车台架连接,从而构成完整的 ECAS 整车试验平台。

台架试验系统的具体结构如图 9 所示,主要包括:① ECAS 整车台架系统,包括整车台架、ECAS 以及各个位置上的传感器等。② 控制系统,利用

3.2 控制性能仿真

为验证控制器的实际控制效果,建立了 ECAS 整车车高调节模型,为重点研究控制器的实际性能,对簧下质量以及路面的影响进行了忽略。对车身分别进行提升和降低调节,从而获得控制前后的车身俯仰角及侧倾角变化,仿真参数参考表 1,仿真结果如图 7 和图 8 所示。

从图 7 和图 8 中可以明显看出,无论是车身提升过程还是车身降低过程,所设计的整车姿态模糊控制器均能实现车身姿态的良好控制,车高调节过程中的车身俯仰角和侧倾角均明显减小,车辆动态性能得到了明显改善。

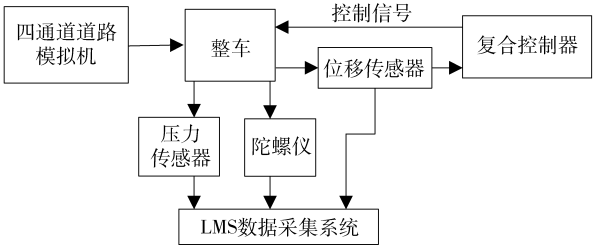


图 9 台架试验系统

Fig. 9 Bench test system

D2P 128pin 快速开发平台配套的刷写软件将前文制定的 ECAS 车高及整车姿态控制策略下载到控制器中,通过传感器实现控制器与整车台架系统间的

直接连接。试验台架装置的具体布置如图 10 所示。

分别进行车身提升和降低两个过程的试验分析,同时利用陀螺仪记录车高调节过程中的整车姿态变化,其中,车高调节试验结果如图 11 所示,整车姿态变化如图 12、13 所示。

由图 11 可以看出,所设计的车高调节控制器均能改善 ECAS 车高调节过程中的振荡现象,系统过充和过放问题得到了有效解决。但神经网络 PID 控制器相较于模糊 PID 控制器,响应更加迅速,精度明显提高,这主要是由于神经网络能够根据系统实际运行情况,通过训练算法及时调整数据,从而提高系



图 10 整车台架布置
Fig. 10 Bench test arrangement

统自适应能力。

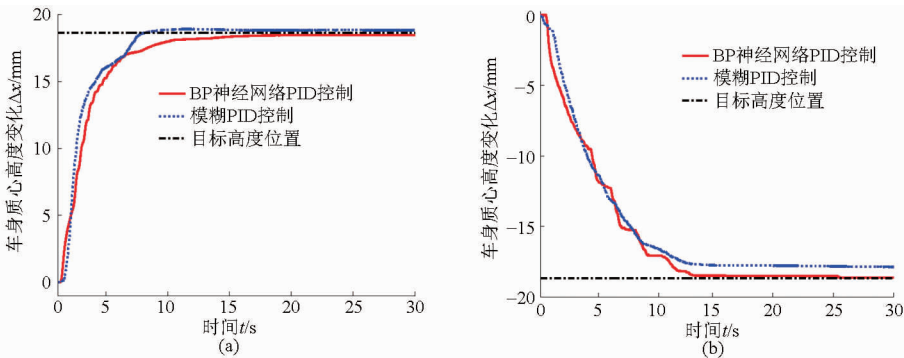


图 11 车高调节试验结果
Fig. 11 Test results of vehicle height adjustment
(a) 车身提升 (b) 车身降低

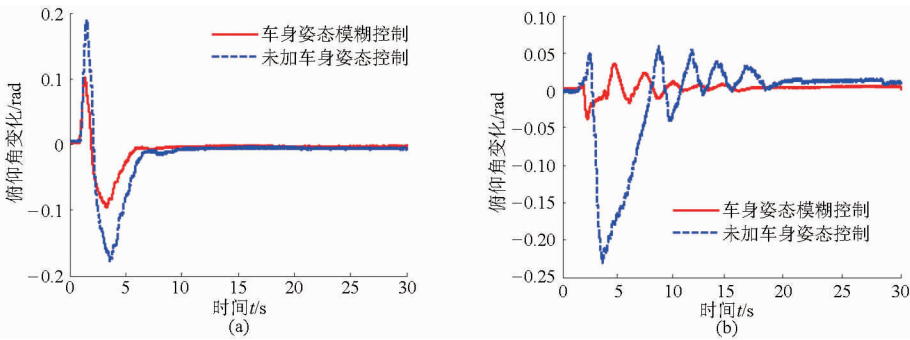


图 12 车身俯仰角控制效果对比
Fig. 12 Control effect contrast of body pitch angle
(a) 车身提升 (b) 车身降低

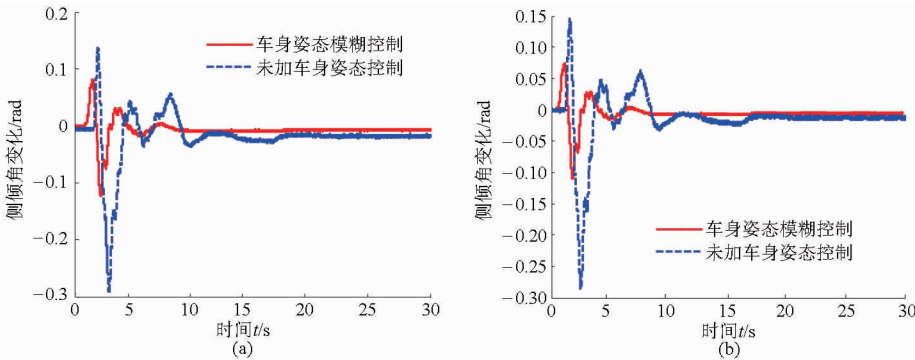


图 13 车身侧倾角控制效果对比
Fig. 13 Control effect contrast of body roll angle
(a) 车身提升 (b) 车身降低

从图中试验结果可以看出,对车高调节过程中的整车姿态施加控制之后,车身俯仰角和侧倾角均得到明显减小,尤其是响应峰值,降幅十分明显,说明所设计的姿态模糊控制器能够有效抑制车高调节过程中的整车姿态变化,保证了整车姿态稳定性。

5 结论

(1)基于BP神经网络PID的车高调节控制器能够有效改善ECAS车高调节过程中过充、过放以

及振荡现象,相较于模糊PID控制器,系统响应更加迅速,控制精度明显提高。整车姿态模糊控制器能够有效抑制车高调节过程中的车身俯仰和侧倾。

(2)通过D2P快速开发平台可以实现ECAS车高调节及整车姿态控制策略与整车台架试验系统的有效对接。台架试验结果表明,所设计的车高控制系统不仅能够实现车身高度的良好跟踪,同时改善了车高调节过程中的整车姿态失稳现象。

参 考 文 献

- 1 庞辉,彭威,原园. 随机激励下重载车辆空气悬架参数多目标优化[J]. 振动与冲击,2014,33(6):156-160.
Pang Hui, Peng Wei, Yuan Yuan. Multi-objective optimization of pneumatic suspension parameters for heavy vehicle under random excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 156-160. (in Chinese)
- 2 汪少华,陈龙,孙晓强,等. 电控空气悬架系统阻尼多模式自适应切换控制研究[J]. 农业机械学报,2013,44(12):22-28.
Wang Shaohua, Chen Long, Sun Xiaoqiang, et al. Damping multi-mode adaptive switching control of ECAS system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 22-28. (in Chinese)
- 3 Bao W N, Chen L P, Zhang Y Q, et al. Fuzzy adaptive sliding mode controller for an air spring active suspension [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(7): 1057-1065.
- 4 孙晓强,陈龙,汪少华,等. 半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制研究[J]. 农业机械学报,2015,46(3):351-357.
Sun Xiaoqiang, Chen Long, Wang Shaohua, et al. Research on damping multi-model adaptive control of semi-active air suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 351-357. (in Chinese)
- 5 吴光强,黄焕军,叶光湖. 基于分数阶微积分的汽车空气悬架半主动控制[J]. 农业机械学报,2014,45(7):19-25.
Wu Guangqiang, Huang Huanjun, Ye Guanghu. Semi-active control of automotive air suspension based on fractional calculus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 19-25. (in Chinese)
- 6 张军,雷帅,段嗣盛. 空气悬架大客车高度控制仿真与试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(4):123-126.
Zhang Jun, Lei Shuai, Duan Sisheng. Simulation and experimental research on air suspension couch height control [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(4): 123-126. (in Chinese)
- 7 汪少华,陈龙,孙晓强. 半主动空气悬架多模式切换控制模型的分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2013,34(6):637-642.
Wang Shaohua, Chen Long, Sun Xiaoqiang. A multi-mode switching control model for semi-active air suspension [J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition, 2013, 34(6): 637-642. (in Chinese)
- 8 徐兴,陈照章,李仲兴. ECAS客车车身高度调节建模及其控制研究[J]. 汽车技术,2009(11):42-46.
Xu Xing, Chen Zhaozhang, Li Zhongxing. Investigation on modeling and control of body height adjustment for bus with electrically controlled air suspension [J]. Automobile Technology, 2009(11): 42-46. (in Chinese)
- 9 Hyunsup Kim, Hyeongcheo Lee. Fault-tolerant control algorithm for a four-corner closed-loop air suspension system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4866-4879.
- 10 Hyunsup Kim, Hyeongcheo Lee. Height and leveling control of automotive air suspension system using sliding mode approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2027-2041.
- 11 何二宝,杜群贵,冯元元. 电控空气悬架车身高度调节的模糊PID控制[J]. 机床与液压,2012,40(5):86-88.
He Erbao, Du Qungui, Feng Yuanyuan. Fuzzy-PID control of body height adjustment for vehicles with electrically controlled air suspension [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2012, 40(5): 86-88. (in Chinese)
- 12 黄俊明,周孔允,徐兴. 电子控制空气悬架高度调节过程非线性模型[J]. 机械工程学报,2009,45(6):278-283.
Huang Junming, Zhou Kongkang, Xu Xing. Nonlinear model on leveling procedure of electronically controlled air suspension [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 278-283. (in Chinese)
- 13 曹玉平,阎祥安. 气压传动与控制[M]. 天津:天津大学出版社,2010.
- 14 孙丽群,李仲兴,徐兴. 半主动空气悬架阻尼准滑模变结构控制与试验[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2014,35(6):621-626.
Sun Liqun, Li Zhongxing, Xu Xing. Quasi-sliding mode variable structure control and test of semi-active air suspension damping [J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition, 2014, 35(6): 621-626. (in Chinese)
- 15 夏晶晶. 基于空气弹簧充放气特性的汽车运行姿态控制[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2013,34(1):13-16.
Xia Jingjing. Attitude control of automobile based on inflation/deflation of air spring [J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition, 2013, 34(1): 13-16. (in Chinese)
- 16 高原,刘奇芳,卢晓晖,等. 车辆起步过程神经网络PID控制研究[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2013,31(4):389-396.
Gao Yuan, Liu Qifang, Lu Xiaohui, et al. Research on launch control strategy for AMT vehicles based on neural network PID [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2013, 31(4): 389-396. (in Chinese)

- vehicle[J]. Electrical Engineering, 2006, 27(1):52-54. (in Chinese)
- 6 秦大同, 谭强俊, 杨阳, 等. 混合动力汽车再生制动控制策略与仿真分析[J]. 汽车工程, 2007, 29(3):220-225.
Qin Datong, Tan Qiangjun, Yang Yang, et al. Simulation on regenerative braking control strategy for hybrid electric vehicle with CVT[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(3):220-225. (in Chinese)
- 7 张俊智, 薛俊亮, 陆欣, 等. 混合动力城市客车串联式制动能量回馈技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6):102-106.
Zhang Junzhi, Xue Junliang, Lu Xin, et al. Series regenerative braking technique for hybrid electric buses[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6):102-106. (in Chinese)
- 8 陈庆樟, 何仁, 商高高. 基于 ABS 的汽车能量再生制动集成控制研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(4):301-304.
Chen Qingzhang, He Ren, Shang Gaogao. A research on integrated control of vehicle regenerative braking based on ABS[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(4):301-304. (in Chinese)
- 9 Peng D, Zhang Y, Yin C L, et al. Combined control of a regenerative braking and anti-lock braking system for hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(6):749-757.
- 10 Zhang J L, Yin C L, Zhang J W. Improvement of drivability and fuel economy with a hybrid antiskid braking system in hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2):205-213.
- 11 王国业, 张彦如, 章娟丽, 等. 基于非平稳约束试验系统的汽车附着极限稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8):1-6.
Wang Guoye, Zhang Yanru, Zhang Juanli, et al. Research for vehicle ESP control performances beyond the extreme adhesion conditions on the unsteady constraint dynamics test system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):1-6. (in Chinese)
- 12 王国业, 刘昭度, 胡仁喜, 等. 基于等效滑移率变化率的汽车 ABS 模糊自适应控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11):242-247.
Wang Guoye, Liu Zhaodu, Hu Renxi, et al. Fuzzy logic direct adaptive control of ABS-equipped vehicles based on equivalent slip differential of tire[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11):242-247. (in Chinese)
- 13 王国业, 刘昭度, 王仁广, 等. 汽车 ABS 在对开路面上的弯道制动性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(4):318-321.
Wang Guoye, Liu Zhaodu, Wang Renguang, et al. Performances of ABS-equipped vehicle during cornering braking on bisectonal roads[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(4):318-321. (in Chinese)
- 14 Wang Guoye, Liu Zhaodu, Ma Yuefeng, et al. EBD control methods of ABS-equipped vehicles during cornering braking[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Natural Sciences, 2007(1):34-37.
- 15 仇斌, 陈全世, 张开斌. 北京市区电动轻型客车制动能量回收潜力[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12):88-91.
Qiu Bin, Chen Quanshi, Zhang Kaibin. Effectiveness of regenerative braking for electric car in Beijing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12):88-91. (in Chinese)
- 16 尹安东, 赵韩, 张炳力. 微型电动乘用车制动能量回收及控制策略的研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2008, 31(11):1760-1766.
Yin Andong, Zhao Han, Zhang Bingli. Study on regenerative braking and control strategy for electric vehicles [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(11):1760-1766. (in Chinese)

(上接第 342 页)

- 17 熊蕊, 刘向东. 含 PID 控制器的迟滞非线性控制系统的主共振及奇异性[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8):72-77.
Xiong Rui, Liu Xiangdong. Principal resonance and singularity of a hysteretic nonlinear control system with a PID controller [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8):72-77. (in Chinese)
- 18 汪少华. 半主动空气悬架混杂系统的多模式切换控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
Wang Shaohua. Research on multi-mode switching control of semi-active air suspension hybrid system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 19 张明君, 张化光. 基于遗传算法优化的神经网络 PID 控制器[J]. 吉林大学学报:工学版, 2005, 35(1):91-96.
Zhang Mingjun, Zhang Huaguang. Neural network PID controller optimized by GA [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(1):91-96. (in Chinese)
- 20 吴志成, 陈思忠, 杨林, 等. 基于有理函数的路面不平度时域模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9):795-798.
Wu Zhicheng, Chen Sizhong, Yang Lin, et al. Model of road roughness in time domain based on rational function [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9):795-798. (in Chinese)