

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.051

# 半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制研究\*

孙晓强 陈龙 汪少华 杨晓峰 徐兴

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 针对常规自适应控制器中辨识算法的收敛速度难以跟随半主动空气悬架模型参数实际变化速度的问题, 提出一种能够满足半主动空气悬架在参数大范围变化时对控制品质较高要求的阻尼多模型自适应控制方法。为改善系统控制速度, 根据半主动空气悬架阻尼实际控制过程, 建立了针对不同车辆运行状态的多个局部线性固定模型, 同时引入一个能够重新赋初值的自适应模型, 以提升系统控制精度。基于误差最小的模型切换控制策略在线选择最佳匹配模型, 并采用自适应控制方法调节最佳阻尼力, 从而构成系统阻尼多模型自适应控制。仿真与实车道路试验结果表明, 所提出的控制方法能够有效改善半主动空气悬架在大范围行驶工况下的控制品质, 车辆垂直振动加速度均方根降幅达 22.8%, 车辆行驶平顺性得到了明显提升。

**关键词:** 半主动空气悬架 阻尼控制 多模型 自适应控制 实车试验

**中图分类号:** U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0351-07

## Research on Damping Multi-model Adaptive Control of Semi-active Air Suspension

Sun Xiaoliang Chen Long Wang Shaohua Yang Xiaofeng Xu Xing

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

**Abstract:** Aiming at the problem that the convergence rate of identification algorithm in conventional adaptive controller is difficult to follow the model parameters actual change rate of semi-active air suspension, a damping multi-model adaptive control method, which could meet the high control quality requirement of semi-active air suspension with parameters changing in wide range, was proposed. In order to improve the system control speed, multiple fixed local linear models were established according to the actual damping control process of semi-active air suspension for different vehicle operating statuses and an adaptive model which initial value could be re-assigned was introduced to enhance the system control precision. The model switching control strategy based on minimum error was used to select the best matching model online and the optimum damping force was regulated by adaptive control method, thus constituting the damping multi-model adaptive control for semi-active air suspension. Simulation and vehicle road test results showed that the proposed method could improve the control quality of semi-active air suspension in wide range driving conditions effectively and the vehicle ride comfort was improved significantly.

**Key words:** Semi-active air suspension Damping control Multi-model Adaptive control Vehicle test

### 引言

作为底盘系统的重要组成部分, 悬架是保证车

辆行驶过程乘坐舒适性、操纵稳定性以及行驶安全性的关键, 因此, 悬架性能的提升研究一直是汽车工程界的关注焦点之一<sup>[1-4]</sup>。近年来, 融合先进电控

收稿日期: 2014-08-07 修回日期: 2014-10-07

\* 国家自然科学基金资助项目(51375212)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20133227130001)、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启动基金资助项目(14JDC067)

作者简介: 孙晓强, 博士生, 主要从事车辆动态性能仿真与控制研究, E-mail: sunxqujs@126.com

技术的主动/半主动悬架引起行业内学者的广泛重视。主动悬架通过对作动器作动力进行直接控制,可使悬架性能得到大幅度提升,但成本高、能耗大成为制约其发展的重要因素<sup>[5-6]</sup>。半主动悬架虽在振动控制品质上稍逊于主动悬架,但其结构相对简单、造价低廉、能耗低,因此,具有良好的工程应用前景<sup>[7]</sup>。

目前,半主动悬架在电控技术方面的研究已十分成熟,但大多数研究均是以刚度不可调节的传统螺旋弹簧为前提,然后针对减振器的可调阻尼特性进行研究。空气弹簧作为一种新型弹性元件,不仅具有理想的偏频特性,而且能够实现车身高度的主动调节,在高级客车、重型商用车以及豪华轿车上已得到广泛使用。因此,基于可变刚度空气弹簧的半主动空气悬架将成为悬架控制领域新的研究方向<sup>[8-9]</sup>。

自适应控制是一种面向一类被控对象具有不同程度不确定性的先进控制技术,其能在被控对象模型知识或环境知识掌握不全或知之甚少的条件下,对系统运行状态进行最优调节,实现高品质的系统控制性能<sup>[10-11]</sup>。然而,半主动空气悬架在复杂多变的交通环境下,呈现出明显的参数时变、突变以及非线性等复杂动态特征<sup>[12]</sup>,常规自适应控制器中辨识算法的收敛速度难以跟随半主动空气悬架模型参数的实际变化速度,从而造成辨识模型不准确,进而导致基于此模型设计的自适应控制器性能不佳。

为此,本文提出采用多模型自适应控制方法对半主动空气悬架进行控制研究,期望通过多个模型快速辨识出半主动空气悬架的模型参数,然后基于辨识模型设计出阻尼力自适应控制器,从而提高系统控制性能。

## 1 半主动空气悬架阻尼控制过程分析

### 1.1 空气弹簧动刚度特性

空气弹簧刚度呈现出明显的非线性和不确定性,因此,半主动空气悬架在阻尼调节过程中需要考虑空气弹簧的动刚度特性。为简化分析,以活塞座为圆柱形的膜式空气弹簧为例(图1),对空气弹簧的动刚度特性进行分析。

由图1可得空气弹簧弹性力的表达式为<sup>[13]</sup>

$$F = (p - p_a)A_e = p_e A_e \quad (1)$$

式中  $F$ ——弹性力, N      $p_a$ ——大气压力, Pa

$p$ ——气囊内气体绝对压力, Pa

$A_e$ ——空气弹簧有效截面积,  $m^2$

$p_e$ ——气囊内气体相对压力, Pa

空气弹簧的刚度可通过弹性力  $F$  直接对空气

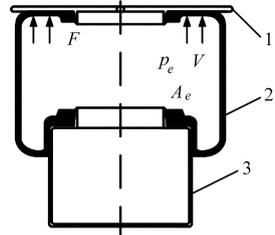


图1 膜式空气弹簧受力示意图

Fig. 1 Force diagram of diaphragm air spring

1. 上盖板 2. 气囊 3. 活塞座

弹簧的垂直位移求导得到,即

$$k = \frac{dF}{ds} = \frac{d(p_e A_e)}{ds} = p_e \frac{dA_e}{ds} + A_e \frac{dp_e}{ds} \quad (2)$$

式中  $k$ ——空气弹簧刚度, N/m

$s$ ——空气弹簧垂直位移, m

气囊内气体变化满足气体状态方程

$$pV^n = \text{const} \quad (3)$$

式中  $V$ ——气囊容积, 即气体体积,  $m^3$

$n$ ——气体多变指数

将式(3)两边分别对  $s$  求导, 可得

$$V^n \frac{dp}{ds} + nV^{n-1} p \frac{dV}{ds} = 0 \quad (4)$$

则气囊内气体相对压力对  $s$  的求导可表示为

$$\frac{dp_e}{ds} = \frac{dp}{ds} = -\frac{np}{V} \frac{dV}{ds} = -\frac{np}{V} A_e \quad (5)$$

其中, 负号表示压力变化趋势与体积变化趋势相反, 计算刚度时取绝对值。

因此, 空气弹簧刚度的表达式为

$$k = p_e \frac{dA_e}{ds} + np \frac{A_e^2}{V} \quad (6)$$

对于活塞座为圆柱形的膜式空气弹簧, 其有效面积在工作行程内的变化可以忽略不计<sup>[14]</sup>, 因此, 空气弹簧刚度可进一步简化为

$$k = np \frac{A_e^2}{V} = n(p_e + p_a) \frac{A_e^2}{V} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 作为可变参数, 气囊内气体相对压力和气囊体积对空气弹簧刚度具有直接影响, 其中, 气体相对压力主要取决于空气弹簧的载荷, 而气囊体积则由空气弹簧的长度所决定。

### 1.2 车身高度调节

车身高度调节是空气悬架的特色功能之一, 主要包括两部分: 高度整体性调节和高度稳定性调节。其中, 高度整体性调节主要针对车辆不同的行驶工况对车身高度模式进行选择, 如图2所示<sup>[15]</sup>。

高度整体性调节可视为在气囊内气体相对压力不变的情况下, 对空气弹簧长度进行调整, 进而影响空气弹簧的刚度。高度稳定性调节则与之相反, 当空气弹簧载荷变化时, 车身高度偏离目标值, 此时,

系统对空气弹簧进行充放气,从而将车身高度保持在允许误差范围内。因此,高度稳定性调节可视为在气囊体积不变的情况下,通过气体相对压力影响空气弹簧的刚度。

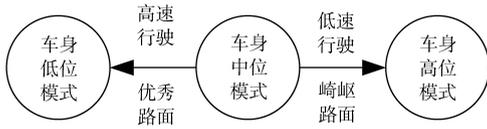


图2 高度整体性调节原理图

Fig. 2 Principle of vehicle height overall adjustment

## 2 半主动空气悬架系统动力学建模

建立半主动空气悬架 1/4 车辆简化模型,如图 3 所示,图中,空气弹簧被简化为一刚度时变的线性弹簧,可调阻尼减振器被等效为基值阻尼器和可调阻尼力,忽略轮胎阻尼,并将其简化为线性弹簧。

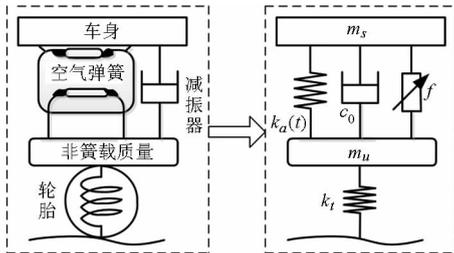


图3 1/4 半主动空气悬架模型

Fig. 3 Semi-active suspension model of quarter vehicle

根据所建模型,得系统动力学方程<sup>[16-17]</sup>

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s = k_a(t)(z_u - z_s) + c_0(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + f \\ m_u \ddot{z}_u = k_a(t)(z_s - z_u) + c_0(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - f + k_t(z_0 - z_u) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $m_s$ ——车身质量,kg  $m_u$ ——非簧载质量,kg  
 $k_a(t)$ ——空气弹簧等效时变刚度,N/m  
 $k_t$ ——轮胎刚度,N/m  
 $f$ ——可调阻尼力,N  
 $c_0$ ——减振器基值阻尼系数,N·s/m  
 $z_s$ ——车身垂直位移,m  
 $z_u$ ——非簧载质量垂直位移,m  
 $z_0$ ——路面垂直振动输入量,m

取系统状态变量和输出变量分别为

$$\mathbf{x} = (z_s, z_u, \dot{z}_s, \dot{z}_u) \quad \mathbf{y} = (\ddot{z}_s, z_s - z_u, k_t(z_0 - z_u))$$

则系统微分方程可改写为状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Fw} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} + \mathbf{Gw} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{u}$  为控制输入, $\mathbf{w}$  为干扰输入,系数矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_a/m_s & k_a/m_s & -c_0/m_s & c_0/m_s \\ k_a/m_u & -(k_a + k_t)/m_u & c_0/m_u & -c_0/m_u \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= [0 \quad 0 \quad 1/m_s \quad -1/m_u]^T \\ \mathbf{F} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad k_t/m_u]^T \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} -k_a/m_s & k_a/m_s & -c_0/m_s & c_0/m_s \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{D} &= [1/m_s \quad 0 \quad 0]^T \quad \mathbf{G} = [0 \quad 0 \quad k_t]^T \end{aligned}$$

对状态方程式(9)进行 Laplace 变换,可得

$$\begin{cases} s\mathbf{X}(s) = \mathbf{AX}(s) + \mathbf{BU}(s) + \mathbf{FW}(s) \\ \mathbf{Y}(s) = \mathbf{CX}(s) + \mathbf{DU}(s) + \mathbf{GW}(s) \end{cases} \quad (10)$$

进一步,得系统输入输出间映射关系

$$\mathbf{Y}(s) = [\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}]\mathbf{U}(s) + [\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{F} + \mathbf{G}]\mathbf{W}(s) \quad (11)$$

将系数矩阵代入式(11),并采用欧拉方法进行离散化,得含时变参数的系统离散时间模型为<sup>[18-19]</sup>

$$\mathbf{A}_1(t, q^{-1})\mathbf{y}(t) = \mathbf{B}_1(t, q^{-1})\mathbf{u}(t-1) + \mathbf{C}_1(t, q^{-1})\mathbf{w}(t-1) \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{1i}(t, q^{-1}) = 1 + a_{1i}(t)q^{-1} + \dots + a_{mi}(t)q^{-m} \\ \mathbf{B}_{1i}(t, q^{-1}) = b_{0i}(t) + b_{1i}(t)q^{-1} + \dots + b_{ni}(t)q^{-n} \\ \mathbf{C}_{1i}(t, q^{-1}) = c_{0i}(t) + c_{1i}(t)q^{-1} + \dots + c_{pi}(t)q^{-p} \end{cases} \quad (i=1,2,3) \quad (13)$$

式中, $m, n, p$  为模型阶次,可根据模型仿真精度进行设定, $q^{-1}$  为后移算子, $[-a_{1i}(t), \dots, -a_{mi}(t); b_{0i}(t), \dots, b_{ni}(t); c_{0i}(t), \dots, c_{pi}(t)]$  为时变模型参数,其与半主动空气悬架系统参数直接相关。

## 3 多模型自适应控制

当自适应控制器中辨识器的初值与实际参数相距较远时,辨识往往需要很长时间才能收敛。因此,对于半主动空气悬架这类模型参数容易发生突变的被控,常规自适应控制往往难以达到令人满意的控制效果。若能根据半主动空气悬架阻尼实际控制过程建立多个模型,并在每个采样时刻基于系统性能指标,将最接近的模型参数切换为辨识器初值,则辨识参数便可迅速收敛至真值,从而保证自适应控制器能够实现最佳的控制性能。

### 3.1 模型集的建立

由前文分析可知,半主动空气悬架在阻尼调节过程中,受车身高度调节的影响,空气弹簧刚度存在明显的时变、突变等复杂特性。因此,根据系统工作原理,考虑针对 3 种典型的车身高度模式以及各高度模式下 3 种不同的载荷条件,分别计算出空气弹簧的刚度,然后以此为基础,建立 9 个线性固定模型,从而形成自适应控制中的固定模型集。

结合后文实车试验,以某高级轿车为研究对象,

根据相关资料进行计算,得到3种高度模式下空气弹簧的等效长度分别为150 mm、175 mm和205 mm,空气弹簧的有效截面积为0.018 m<sup>2</sup>,簧上载荷基值为510 kg,气体多变指数近似为1.3,将上述参数代入式(7),得到基值载荷下空气弹簧在不同高度模式下的刚度系数分别为59 118 N/m、50 673 N/m和43 258 N/m。同理,针对各高度模式下的过载工况(基值载荷的120%)和欠载工况(基值载荷的80%)也可分别计算出空气弹簧的刚度系数。将上述参数分别代入半主动空气悬架系统动力学模型中,即得系统9个线性固定模型。

固定模型的建立保证了系统瞬态响应速度,同时,为改善系统控制精度,这里引入一个能够重新赋初值的自适应模型,并将此自适应模型的初值设置为距离真实模型最近的固定模型的模型参数,从而获得更快的参数收敛速度<sup>[20]</sup>。

模型参数的具体辨识过程:

(1)根据式(12)将系统改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) = & -a_{1i}(t)\mathbf{y}(t-1) - \dots - a_{mi}(t)\mathbf{y}(t-m) + \\ & b_{0i}(t)\mathbf{u}(t-1) + \dots + b_{ni}(t)\mathbf{u}(t-n-1) + \\ & c_{0i}(t)\mathbf{w}(t-1) + \dots + c_{pi}(t)\mathbf{w}(t-p-1) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{即} \quad \mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\theta}(t)^T \boldsymbol{\phi}(t-1) \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}(t)^T = [ -a_{1i}(t) \dots -a_{mi}(t); b_{0i}(t) \dots \\ \quad b_{ni}(t); c_{0i}(t) \dots c_{pi}(t) ] \\ \boldsymbol{\phi}(t-1)^T = [ \mathbf{y}(t-1) \dots \mathbf{y}(t-m); \mathbf{u}(t-1) \dots \\ \quad \mathbf{u}(t-n-1); \mathbf{w}(t-1) \dots \mathbf{w}(t-p-1) ] \end{cases} \quad (16)$$

(2)对式(15)采用改进投影算法进行参数辨识

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) + \frac{\boldsymbol{\phi}(t-1)\mathbf{e}(t)}{1 + \boldsymbol{\phi}(t-1)^T \boldsymbol{\phi}(t-1)} \quad (17)$$

其中,  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$  表示辨识参数,有

$$\begin{cases} \mathbf{e}(t) = [ \mathbf{y}(t) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)^T \boldsymbol{\phi}(t-1) ] \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(t)^T = [ -\hat{a}_{1i}(t) \dots -\hat{a}_{mi}(t); \hat{b}_{0i}(t) \dots \hat{b}_{ni}(t); \\ \quad \hat{c}_{0i}(t) \dots \hat{c}_{pi}(t) ] \end{cases} \quad (18)$$

### 3.2 模型切换原则

为根据车辆运行状态选取一个最接近半主动空气悬架实际动态特性的数学模型,考虑将系统实际输出与所建多个固定模型的输出进行比较,建立切换性能指标,即

$$\begin{aligned} J_j(t) = & \sum_{k=1}^t \alpha(k)^{t-k} | \mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\theta}_j^T \boldsymbol{\phi}(k-1) | \\ & (j=1,2,\dots,9; 0 < \alpha < 1) \end{aligned} \quad (19)$$

式中  $\alpha$ ——加权因子  $t$ ——计算时域

$$\boldsymbol{\theta}_j = [ -a_{1i}^j(t) \dots -a_{mi}^j(t); b_{0i}^j(t) \dots b_{ni}^j(t); c_{0i}^j(t) \dots c_{pi}^j(t) ] \quad (20)$$

由于半主动空气悬架的3个输出在数量级上差异较大,无法进行直接叠加,因此,考虑对其采取同尺度量化处理。首先,在计算时域内统计各输出的均方根,然后确定同尺度量化比例系数

$$\hat{z}_i \beta_1 = (z_s - z_u) \beta_2 = k_t (z_0 - z_u) \beta_3 \quad (21)$$

式中,各输出均为均方根,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  分别为相应的比例系数,则系统切换性能指标改写为

$$J_j(t) = \sum_{k=1}^t \alpha(k)^{t-k} | \bar{\mathbf{y}}(k) - \boldsymbol{\theta}_j^T \boldsymbol{\phi}(k-1) | \quad (22)$$

式中  $\bar{\mathbf{y}}(k)$ ——经同尺度量化处理后的系统输出  
每一采样时刻基于性能指标(式(21))求取最接近半主动空气悬架实际动态特性的模型参数

$$j(t) = \arg \min_{1 \leq j \leq 9} J_j(t) \quad (23)$$

然后将该模型参数赋值给自适应模型,即

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \boldsymbol{\theta}_{j(t)} \quad (24)$$

### 3.3 自适应控制器

为实现系统阻尼力最优调节,在采样时刻  $t$ ,基于辨识参数,按照如下步骤构造自适应控制器<sup>[21]</sup>。

(1)针对式(12),定义辅助输出

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(t) = & \mathbf{P}(q^{-1})\mathbf{A}_1(q^{-1})\mathbf{y}(t) + \mathbf{Q}(q^{-1})\mathbf{u}(t-1) + \\ & \mathbf{R}(q^{-1})\mathbf{w}(t-1) \end{aligned} \quad (25)$$

其中,  $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  满足

$$\mathbf{P}(q^{-1})\mathbf{B}(q^{-1}) + \mathbf{Q}(q^{-1})\mathbf{F}(q^{-1}) + \Delta\mathbf{R}(q^{-1}) = \mathbf{I} \quad (26)$$

其中

$$\Delta = \mathbf{I} - q^{-1}$$

(2)定义线性饱和函数

给定2个正整数  $L$ 、 $M$ , 满足  $L \leq M$ , 如果函数  $\sigma(\cdot)$  连续非降,且满足

$$\begin{cases} s\sigma(s) > 0 & (s \neq 0) \\ \sigma(s) = s & (|s| \leq L) \\ |\sigma(s)| = M & (|s| > L) \end{cases} \quad (27)$$

则称函数  $\sigma(\cdot)$  为满足常数  $L$ 、 $M$  的线性饱和函数。

(3)定义非线性自适应控制器

结合所定义的辅助输出和线性饱和函数,构成非线性控制器

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) = & -\sigma_{k-1} [\Delta^{k-1} \mathbf{f}(t) + \sigma_{k-2} (\Delta^{k-2} \mathbf{f}(t) + \dots + \\ & \sigma_0 (\mathbf{f}(t) - \mathbf{r}(t)) \dots ] \end{aligned} \quad (28)$$

其中,  $\sigma_i$  为满足正数 ( $L_i$ 、 $M_i$ ) ( $i=0,1,\dots,k-1$ ) 的线性饱和函数,且  $L_i$ 、 $M_i$  满足

$$\begin{cases} L_i \leq M_i & (i=0,1,\dots,k-1) \\ M_i < 0.5L_{i+1} & (i=0,1,\dots,k-2) \end{cases} \quad (29)$$

基于上述控制器,半主动空气悬架系统的实际输出  $\mathbf{y}(t)$  将收敛于参考输出  $\mathbf{r}(t)$ 。

## 4 仿真及实车道路试验

为验证半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制方法的可靠性和有效性,针对车辆大范围行驶工况进行了控制系统的性能仿真与实车道路试验。

### 4.1 控制性能仿真

结合不同的车身高度模式及载荷条件,设计了符合车辆实际运行状态的2种典型仿真工况,如表1所示。

由表1可以看出,工况1主要针对车身高度在

表1 典型仿真工况

Tab. 1 Typical simulation conditions

	仿真时间/s	路面等级	车速/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	高度	载荷
工况1	0~5	C	60	中	额定
	5~10	B	100	低	额定
	10~15	E	20	高	额定
工况2	0~5	C	60	中	额定
	5~10	C	60	中	过载
	10~15	C	60	中	欠载

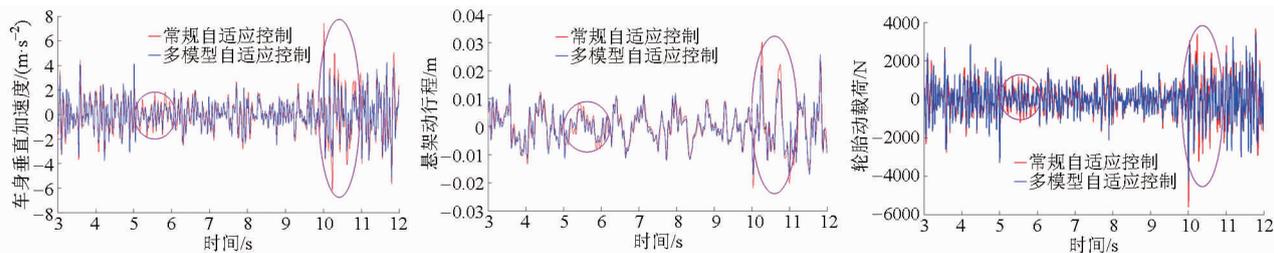


图4 工况1仿真结果

Fig. 4 Simulation results of condition 1

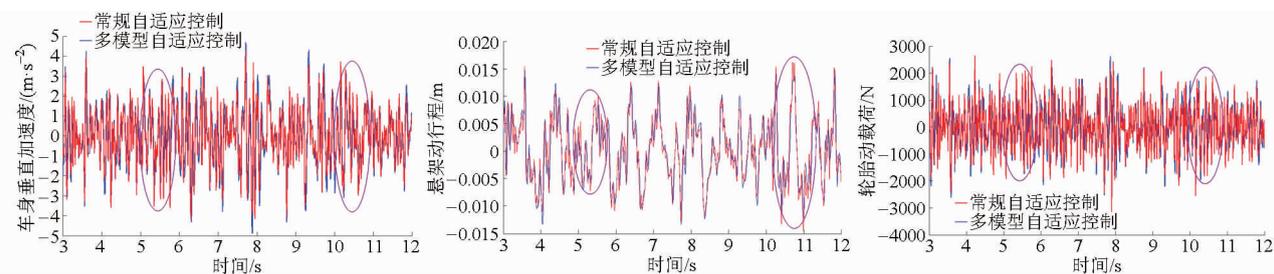


图5 工况2仿真结果

Fig. 5 Simulation results of condition 2

### 4.2 实车道路试验

根据仿真结果,对控制器相关特性参数进行分析,从而实现系统控制结构的进一步完善,在此基础上,利用D2P 128pin快速开发平台配套的刷写软件将前述半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制策略下载到控制器中,然后通过传感器和信号处理单元实现控制器与实车半主动空气悬架系统间的直接连接,从而完成实车道路试验。

半主动空气悬架系统的阻尼调节是通过图6所示的空气弹簧与可调阻尼减振器同轴一体式减振支

不同行驶工况下的整体性调节,工况2则是针对不同载荷条件下的高度稳定性调节,二者均能验证多模型自适应控制方法对半主动空气悬架运行状态参数的辨识能力。仿真所用车辆参数为:基值阻尼系数  $c_0 = 1\,500\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ ,非簧载质量  $m_u = 50\text{ kg}$ ,轮胎刚度  $k_t = 192\text{ kN}/\text{m}$ ;自适应模型中,空气弹簧刚度系数的初值设定为  $50\,673\text{ N}/\text{m}$ 。2种工况下的仿真结果如图4、5所示。

由图4、5可知,在0~5s内,多模型自适应控制效果与常规自适应控制相当,仅存在因线性饱和和函数随机性而产生的小幅差异,这主要是由于所设定的空气弹簧刚度系数初值与实际参考值相等,因此,在此时域内,两种方法的模型参数均能迅速收敛;在5~10s和10~15s内,由于半主动空气悬架参考模型的参数产生了突变,常规自适应控制器在初始阶段辨识模型参数不能迅速收敛,进而导致基于辨识模型的阻尼力控制器控制效果不佳(见图中画圈部分),而多模型自适应控制则能迅速切换到相应的固定模型,从而实现良好的控制性能。

柱实现的。由图6可见,该减振器附加了一个CDC (Continual damping control) 阀,通过该CDC阀对减振器内部油液流动进行控制,从而实现减振器阻尼特性的连续调节,为半主动空气悬架阻尼控制性能验证奠定了基础。

以装有该减振支柱的某高级轿车为试验对象,对基于D2P快速开发平台的半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制器的实际性能进行实车道路试验验证,试验布置如图7所示。

结合试验条件及验证目标,进行了校园道路上

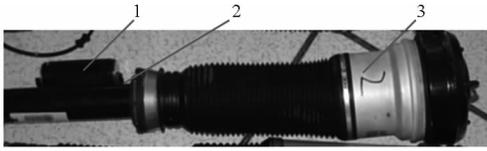


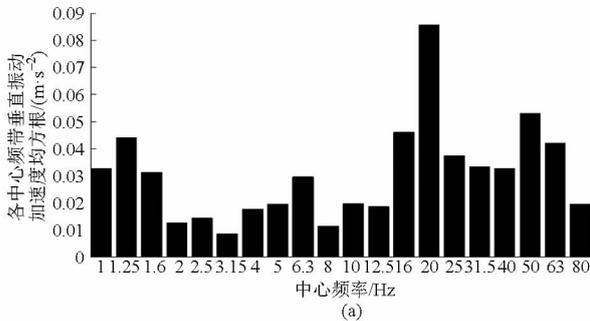
图6 空气弹簧减振器同轴一体式减振支柱实物图

Fig.6 Coaxial integrated strut with air spring and damper

1. CDC阀 2. 减振器 3. 空气弹簧

车速从60 km/h迅速切换到100 km/h的实车道路试验,结合车辆运行原理可知,此时,半主动空气悬架车身高度模式将由中位迅速切换到低位,空气弹簧刚度系数发生了突变。因此,该试验可以有效验证多模型自适应控制方法对半主动空气悬架实际运行状态的辨识能力。实车道路试验结果如图8所示。

由图8可以明显看出,相对于常规自适应控制,多模型自适应控制可以有效降低车辆垂直振动加速度均方根,尤其在人体较敏感的低频区域,降幅十



分明显。经计算,垂直振动加速度中心频率加权均方根分别为 $0.035 \text{ m/s}^2$ (常规自适应)和 $0.027 \text{ m/s}^2$ (多模型自适应),降幅达22.8%,说明多模型自适应控制方法能够有效辨识出半主动空气悬架的实际状态参数,实现模型参数的迅速收敛,从而达到良好的阻尼控制效果,提高车辆行驶平顺性。

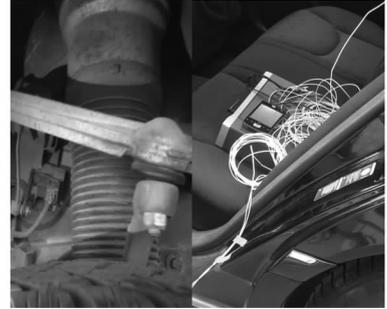


图7 实车道路试验布置

Fig.7 Real vehicle test arrangement

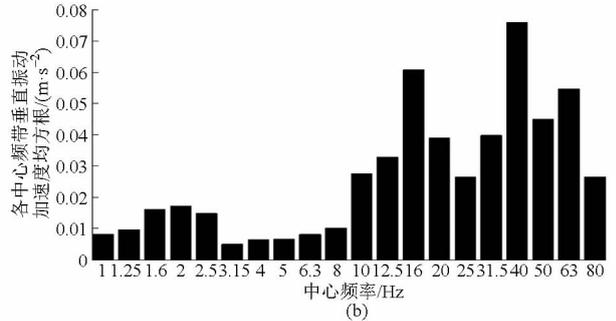


图8 实车道路试验结果

Fig.8 Real vehicle test results

(a) 常规自适应控制 (b) 多模型自适应控制

## 5 结论

(1) 结合空气弹簧的动刚度特性以及半主动空气悬架阻尼控制特点,提出了阻尼多模型自适应控制方法,确定了系统的固定模型和自适应模型,完成了阻尼多模型自适应控制器设计。

(2) 在大范围行驶工况下进行了阻尼多模型自

适应控制系统控制品质的性能仿真,验证了控制系统的有效性,在此基础上,完成了控制系统的实车道路试验,试验结果表明,多模型自适应控制方法能够实现模型参数的快速收敛,提高半主动空气悬架在复杂工况下的整体性能,系统控制品质得到了明显提升。

## 参 考 文 献

- 马然,朱思洪,Do Minh Cuong. 拖拉机前桥半主动悬架特性参数匹配与控制[J]. 农业机械学报,2013,44(12):6-10.  
Ma Ran, Zhu Sihong, Do Minh Cuong. Parameters matching and control of tractor front axle semi-active suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(12):6-10. (in Chinese)
- 孙晓强,陈龙,汪少华,等. 2级串联式ISD悬架非线性建模与参数优化[J]. 农业机械学报,2014,45(6):7-13.  
Sun Xiaoqiang, Chen Long, Wang Shaohua, et al. Nonlinear modeling and parameter optimization of two-stage series-connected ISD suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(6):7-13. (in Chinese)
- 高晋,杨秀建,牛子孺. 硬点对悬架和操稳性能灵敏度分析及鲁棒性优化[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2014,35(3):249-256.  
Gao Jin, Yang Xiujian, Niu Ziruo. Robust optimization and sensitivity analysis of hard points on suspension characteristics and full vehicle handling performance [J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition,2014,35(3):249-256. (in Chinese)
- Guido Koch, Tobias Kloiber. Driving state adaptive control of an active vehicle suspension system [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2014,22(1):44-57.
- 汪若尘,孟祥鹏,施德华,等. 车辆惯容器-弹簧-阻尼器半主动悬架模糊控制[J]. 农业机械学报,2013,44(12):1-5.

- Wang Ruochen, Meng Xiangpeng, Shi Dehua, et al. Fuzzy control of vehicle ISD semi-active suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 1-5. (in Chinese)
- 6 John Crews, Michael Mattson, Gregory Buckner. Multi-objective control optimization for semi-active vehicle suspensions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(23): 5502-5516.
- 7 杨柳青, 陈无畏, 张荣芸, 等. 基于控制律重组的汽车半主动悬架容错控制与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 1-9. Yang Liuqing, Chen Wuwei, Zhang Rongyun, et al. Fault-tolerant control and experiment on vehicle semi-active suspension system based on control law reconfiguration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 1-9. (in Chinese)
- 8 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.
- 9 Yin Zhihong, Amir Khajepour, Cao Dongpu, et al. A new pneumatic suspension system with independent stiffness and ride height tuning capabilities [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(12): 1735-1746.
- 10 郑玲, 邓兆祥, 李以农. 汽车半主动悬架的模型参考自适应控制[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 99-102. Zheng Ling, Deng Zhaoxiang, Li Yinong. Model reference adaptive control of semi-active suspensions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 99-102. (in Chinese)
- 11 徐兴, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于数字图像的水位识别系统及其方法[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 33-39. Xu Xing, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Digital image-based water level recognizing system and method [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1): 33-39. (in Chinese)
- 12 Hyunsup Kim, Hyeongcheol 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.
- 13 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)
- 14 方瑞华, 解跃青, 雷雨成. 空气悬架理论及其关键技术[J]. 同济大学学报, 2003, 31(9): 1072-1076. Fang Ruihua, Xie Yueqing, Lei Yucheng. Air suspension technology and developing trend [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(9): 1072-1076. (in Chinese)
- 15 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)
- 16 Alexey Kuznetsov, Musa Mammadov, Ibrahim Sultan, et al. Optimization of a quarter-car suspension model coupled with the driver biomechanical effects [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(12): 2937-2946.
- 17 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)
- 18 李晓理, 王书宁. 多模型自适应控制在机器人手臂控制当中应用[J]. 机器人, 2002, 24(1): 16-19. Li Xiaoli, Wang Shuning. Application of multimodel adaptive control algorithm in robotic manipulator control [J]. Robot, 2002, 24(1): 16-19. (in Chinese)
- 19 施卫东, 李辉, 王川, 等. 低比转数离心泵进口预旋的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 652-657. Shi Weidong, Li Hui, Wang Chuan, et al. Numerical calculation of inlet prewhirl flow in low-specific-speed centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8): 652-657. (in Chinese)
- 20 王伟, 李晓理. 多模型自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 21 赵英. 多模型自适应控制在循环流化床锅炉控制系统中的应用与研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.