

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.11.014

# 基于多工况模式的复合型悬架平顺性研究\*

孙文<sup>1,2</sup>, 李晨阳<sup>1,4</sup>, 王军年<sup>2</sup>, 万旭君<sup>3</sup>, 刘桂均<sup>1</sup>, 李伟<sup>4</sup>

(1. 常州工学院汽车工程学院, 常州 213032; 2. 吉林大学, 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130025;  
3. 北汽重型汽车有限公司, 常州 213003; 4. 山东交通学院汽车工程学院, 济南 250357)

**[摘要]** 悬架系统作为调控车辆平顺性的核心组件,其性能直接决定了车辆行驶的优劣。针对目前车辆在复杂路面行驶过程中平顺性较差的问题,本文构建了不同于传统悬架的复合型悬架结构,并搭建该悬架的整体系统构架。首先为了探究整车复合型悬架的振动机理,构建整车复合型悬架动力学模型;其次结合驾驶员复杂的行驶需求,构建基于多工况的复合悬架系统控制策略,通过车辆行驶中不同的加权加速度均方根值验证其优化效果,并结合反空气弹簧模型证明了该系统可以减少空气弹簧的磨损;最后,在VI-Grade紧凑型驾驶模拟器中根据所构建的复杂工况进行试验验证,对比有无控制时的车身垂向加速度、侧倾角加速度和俯仰角加速度试验结果。试验结果表明,通过复杂工况中的车辆性能测试,所提出的复合型悬架系统在直线、弯道和制动3种工况下改善性能分别达到了32.26%、23.77%和7.38%,可以有效改善车辆行驶时的平顺性性能,解决了正常行驶下空气弹簧的损耗问题。

**关键词:** 复合型悬架系统设计; 平顺性优化; 多工况控制策略; 工作模式切换策略; 多工况验证

## Research on Ride Comfort of Composite Suspension Based on Multiple Working Condition Modes

Sun Wen<sup>1,2</sup>, Li Chenyang<sup>1,4</sup>, Wang Junnian<sup>2</sup>, Wan Xujun<sup>3</sup>, Liu Guijun<sup>1</sup> & Li Wei<sup>4</sup>

1. College of Automotive Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032;

2. Jilin University, National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Changchun 130025;

3. BAIC Heavy Duty Truck Co., Ltd., Changzhou 213003;

4. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357

**[Abstract]** As a core component for regulating vehicle ride comfort, the performance of the suspension system directly determines the quality of vehicle driving. For the current problem of poor ride comfort during vehicle driving on complex roads, a composite suspension structure that is different from traditional suspensions is constructed in this paper, and the overall system architecture of this suspension is established. Firstly, in order to explore the vibration mechanism of the composite suspension of the complete vehicle, a dynamic model of the composite suspension of the complete vehicle is constructed. Secondly, combined with the complex driving requirements of the driver, a control strategy for the composite suspension system based on multiple operating conditions is constructed. The optimization effect is verified by different weighted RMS values of acceleration during vehicle driving, and the anti-air spring model is used to prove that the system can reduce the wear of the air spring. Finally, in the VI-Grade compact driving simulator, experimental verification is conducted based on the constructed complex operating conditions, and the test results of body vertical acceleration, roll angle acceleration, and pitch angle acceleration with and without control are compared. The experimental results show that the proposed composite suspension system can improve performance by 32.26%, 23.77%, and 7.38% under straight, curved, and braking conditions,

\* 国家自然科学基金(52272365, 62273061)、江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJA580001, 22KJB580001)、吉林省中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(20230508050RC)和吉林省自然科学基金(20220101200JC)资助。

原稿收到日期为2024年03月16日,修改稿收到日期为2024年04月23日。

通信作者:王军年,教授,博士,E-mail:wjn@jlu.edu.cn。

respectively, through vehicle performance testing under complex conditions. It can effectively improve the ride comfort performance of vehicles while driving and solve the problem of air spring wear under normal driving conditions.

**Keywords: composite suspension system; ride comfort optimization; multi-condition control strategy; control strategy of switching working mode; multi-condition verification**

## 前言

随着社会整体经济总量和人民生活水平的提高,汽车的用途也随之发生了改变,智能化、舒适化逐渐成为人们出行的需求重点,因此当前对于车辆舒适性的研究急需得到发展<sup>[1-2]</sup>。近年来,为了有效提升车辆行驶平顺性,构建新型悬架系统成为了众多学者的研究重点,针对悬架整体系统进行分析设计展开了大量研究,聚焦提高车辆行驶的平顺性<sup>[3-4]</sup>。

由于悬架系统对车辆平顺性的影响至关重要,因此很多学者在提高平顺性方面进行了诸多尝试:优化传统悬架结构<sup>[5]</sup>;采用不同的悬架弹性元件和减振器,设计新型半主动悬架结构<sup>[6]</sup>;采用空气弹簧等元件,以直接改变悬架作用力的方式进行主动悬架结构改制<sup>[7]</sup>。

目前很多学者针对主动悬架开发了多种控制策略,用以提高车辆在复杂工况下行驶的平顺性。为了提升主动悬架的性能,作用力控制器的搭建是目前主要的一个研究方向<sup>[8]</sup>,主要采用最优控制、模糊控制和自适应控制等方法。

(1)最优控制:徐明等<sup>[9]</sup>通过解析力学模型搭建了一种新型优化控制器,进一步提高车辆行驶时的平顺性;Lei等<sup>[10]</sup>基于线性二次方程设计了最优控制器,解决了系统时滞性问题,抑制了路面引起的悬架振动。

(2)模糊控制:曹艳玲等<sup>[11]</sup>通过硬件在环仿真试验建立了能够提高响应速度的控制器,改善了整车性能;Nazemian等<sup>[12]</sup>建立了空气弹簧模型并进行分析,基于其刚度可变的原理,建立了一种基于模糊控制的空气弹簧气囊控制系统,提高了车辆在一定工况下行驶的平顺性。

(3)自适应控制:Fouad等<sup>[13]</sup>针对悬架控制时所出现的时滞性问题,通过自适应控制算法,调节整车运行时的俯仰运动,解决了控制系统时滞性问题。

综上所述,目前在悬架控制器研究中,多数控制

策略只能与单一工况模型适配,在进行整车多工况运行时会导致主动悬架无法充分发挥优势,因此单一控制策略无法实现多工况下的最优效果。

此外,在进行车辆平顺性验证时,其试验的工况是确保控制策略可以普遍运行的关键。Kenne等<sup>[14]</sup>建立了随机路面工况和凹凸路面工况用以验证所设计的控制器的优良性;Yin等<sup>[15]</sup>则分别建立了随机路面工况和减速带路面工况用以验证其所选用的控制算法的优越性;而张丽霞等<sup>[16]</sup>采用了单一等级路面工况用以分析所提出的平滑天棚控制策略的改善性能;许力等<sup>[17]</sup>也采用单一等级路面作为试验工况,验证了主动悬架分数阶控制策略的优越性;汪少华等<sup>[18]</sup>建立了C级和D级路面不同车速的混合直线工况,验证了多级可调模型可保持较好的平顺性。但是上述文献中仅仅构建了相对单一的直线行驶工况,并未讨论所构建的悬架系统在其它工况下的行驶表现,验证数据较为单一,无法确保所构建的控制策略的普遍性。

综上所述,目前研究主动悬架系统仅采用单一策略控制结合构建单一工况进行仿真试验,使得悬架系统实用性降低,难以确保复杂路面下车辆行驶的优良平顺性。鉴于此,本文首先针对复合型悬架的并联弹性元件结构力学特性建立整体架构模型;其次构建多种控制策略相结合的复合型悬架模型控制策略,用以提高车辆行驶的平顺性;最后在VI-Grade仿真平台构建复合路面等级下的直线、弯道、制动多种工况,综合对比复合型悬架和被动悬架的平顺性指标,在明确复合型悬架系统可行性的基础上,验证其可以在改善整车平顺性的同时降低空气弹簧气压的工作频率进而降低损耗的优势。

## 1 复合型悬架系统建立

### 1.1 复合型悬架系统控制原理架构

本文所提出的复合型悬架系统架构如图1所示,其中包括数据处理模块、基于多工况的悬架运行模式控制器和执行层模块3部分。

其功能如下所示。

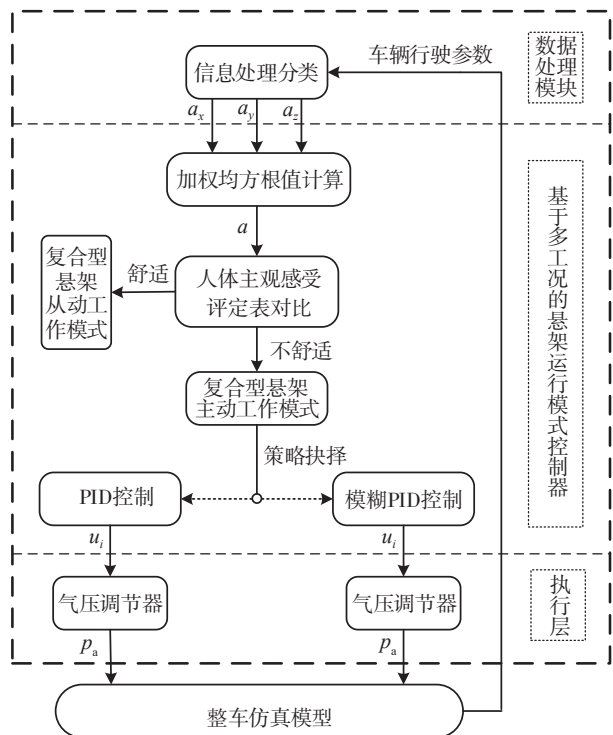


图1 复合型悬架系统架构

(1)数据处理模块:整车模型输出车辆在对应工况下的垂向、纵向、横向加速度,为舒适度指标分析提供数据支撑。

(2)基于多工况的悬架运行模式控制器:数据处理模块输出的加速度均方根值与人体主观感受评定表进行对比分析,进行复合型悬架系统工作模式切换。当复合型悬架进入主动模式时,根据车辆当前的运行工况选择不同的控制阶段,计算系统可变量 $u_i$ 。

(3)执行层模块:通过输入上层控制器所求解得的系统可变量 $u_i$ 到气压调节器中,计算空气弹簧提供该可变量所需要的额外气压,最后输出该气压值至整车仿真模型。

### 1.2 复合型悬架结构构建

由于通用的悬架结构无法支撑本文所设计的系统架构,本文基于该架构的运行流程并结合螺旋弹簧和空气弹簧的特性,构建一种双弹性元件并联的复合型悬架结构,该结构不仅可以通过空气弹簧对车辆行驶的平顺性进行调节,还可以在空气弹簧损坏时采用螺旋弹簧保证车辆行驶的安全性,为了更直观地表现出复合悬架结构不同于现有的通用悬架,本文对所构思的整体结构进行三维建模,其结构图如图2所示。

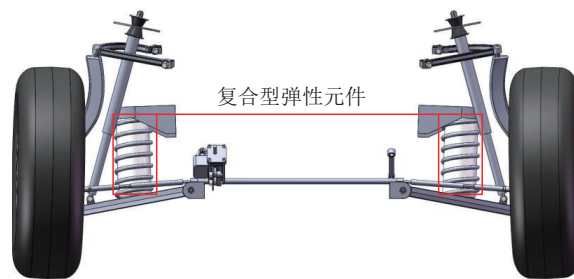


图2 复合型悬架整体结构

### 1.3 复合型悬架系统模型

为了更直观地表述复合型悬架结构的运动,同时降低控制系统研究的复杂度,本文对车辆整体复杂运动进行简化,仅保留车辆整体运动所包含的车辆垂向运动、侧倾、俯仰3个车身自由度和4个主动悬架簧下部分的跳动等7个自由度<sup>[19]</sup>,构建整车复合型悬架系统模型。相比于传统的单个四分之一悬架模型只能验证垂向运动的控制效果,本文所构建的整车复合型悬架系统模型可以有效验证垂向、俯仰、侧倾运动的控制效果,使得整个系统的验证效果更加准确。

整车悬架系统由各项子系统相互协调构成,系统由4个控制器共同作用,进而实现对垂向、俯仰和侧倾运动的控制。本文所构建的整车复合型悬架系统如图3所示。

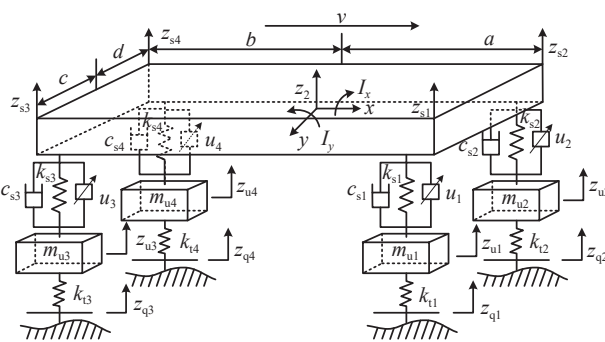


图3 整车复合型悬架模型

图3所示的复合型悬架整车动力学方程,其垂向运动方程如下:

$$m_s \ddot{z}_2 = \sum_{i=1}^4 [-c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{ui}) - k_{si}(z_{si} - z_{ui}) + u_i] \quad (1)$$

俯仰运动方程:

$$I_y \ddot{\theta} = a \sum_{i=1,2} [-c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{ui}) - k_{si}(z_{si} - z_{ui}) + u_i] - b \sum_{i=3,4} [-c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{si}) - k_{si}(z_{si} - z_{ui}) + u_i] \quad (2)$$

侧倾运动方程:

$$I_x \ddot{\varphi} = c \sum_{i=1,3} [-c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{ui}) - k_{si}(z_{si} - z_{ui}) + u_i] - d \sum_{i=2,4} [-c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{ui}) - k_{si}(z_{si} - z_{ui}) + u_i] \quad (3)$$

非簧载质量运动方程:

$$m_{ui} \cdot \ddot{z}_{ui} = k_{si}(z_{si} - z_{ui}) + c_{si}(\dot{z}_{si} - \dot{z}_{ui}) - k_{ti}(z_{ui} - z_{qi}) - u_i \quad (4)$$

悬架支点处的位移方程:

$$\begin{cases} z_{s1} = z_2 + a\theta + c\varphi \\ z_{s2} = z_2 + a\theta - d\varphi \\ z_{s3} = z_2 - b\theta + c\varphi \\ z_{s4} = z_2 - b\theta - d\varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $m_{ui}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是非簧载质量;  $m_s$  是簧载质量;  $k_{si}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是空气弹簧与螺旋弹簧总刚度;  $k_{ti}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是轮胎刚度;  $c_{si}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是悬架阻尼系数;  $a$  是质心到前轴的垂直距离;  $b$  是质心到后轴的垂直距离;  $c$  是质心到右侧的垂直距离;  $d$  是质心到左侧的垂直距离;  $I_x$  是侧倾转动惯量;  $I_y$  是俯仰转动惯量;  $\theta$  是俯仰角;  $\varphi$  是侧倾角;  $z_{qi}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是路面输入;  $z_{si}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是簧载质量的位移;  $z_{ui}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是非簧载质量的位移;  $z_2$  是车身垂向的位移;  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 是系统可变量。

由整车的微分方程可得状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (6)$$

其中系统的状态变化量为

$$X = (z_2, \varphi, \theta, z_{u1}, z_{u2}, z_{u3}, z_{u4}, z_{q1}, z_{q2}, z_{q3}, z_{q4}, \dot{z}_2, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{z}_{u1}, \dot{z}_{u2}, \dot{z}_{u3}, \dot{z}_{u4})^T$$

系统输出变量为

$$Y = (\ddot{z}_2, \ddot{\varphi}, \ddot{\theta}, z_{s1} - z_{u1}, z_{s2} - z_{u2}, z_{s3} - z_{u3}, z_{s4} - z_{u4}, z_{q1} - z_{u1}, z_{q2} - z_{u2}, z_{q3} - z_{u3}, z_{q4} - z_{u4})^T$$

系统控制变量为

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T$$

## 2 复合型悬架系统控制策略

### 2.1 PID控制

控制策略作为空气弹簧系统调控的核心,其中一些如PID控制、模糊控制等控制策略的应用已逐步成熟<sup>[20]</sup>。其中PID控制算法更加成熟,在使用方面也更为简单、可靠、实用<sup>[21]</sup>。因此本文首先选用PID进行架构验证。

本文采用的PID控制策略,其控制流程如图4所示。

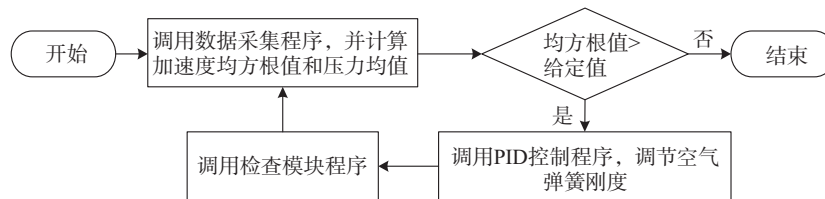


图4 空气弹簧PID控制流程

首先对车辆行驶过程中的空气弹簧内部压力进行数据采集,通过式(7)对一定采样时间内的加速度曲线进行均方根值的计算。控制器则根据空气弹簧理想数学模型计算出的额外力需求,控制空气弹簧的工作气压,用以调节空气弹簧气囊内的压力,提高车辆行驶的平顺性<sup>[22]</sup>。

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_i^2}{N}} \quad (7)$$

式中:  $N$  表示一定的采样时间内所采集的数据个数;  $X_i$  表示一定的采样时间内的对应数据。

当车辆在不同工况下行驶时,只要其运行工况保持不变则该悬架系统的评价指标曲线的总体趋势

大致一样<sup>[23-25]</sup>,所以本节将工况设定为70 km/h,路面谱采用C级路面。通过分析图5可以得出,未对空气弹簧施加控制时,车身垂向加速度的均方根值为0.064 8;施加控制后数值为0.049 1。由PID控制

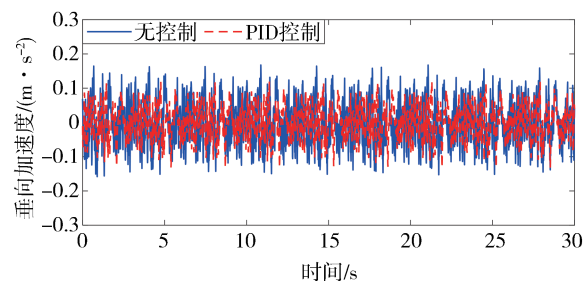


图5 PID控制下垂向加速度响应对比图

对车身垂向加速度性能数值提高百分比为24.2%。

### 2.2 模糊PID控制阶段

本文所建立的模糊控制器以簧载质量垂向速度和加速度作为模糊控制器的输入变量,以调整系数 $\omega_i$ 为输出变量,同时采用PID三者进行调控。输入和输出的论域均为 $[-6, 6]$ ,且其模糊子集采用 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 表示,分别对应的输入输出变量为 $[-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$ 。

图6为降低垂向加速度的模糊PID控制器。在

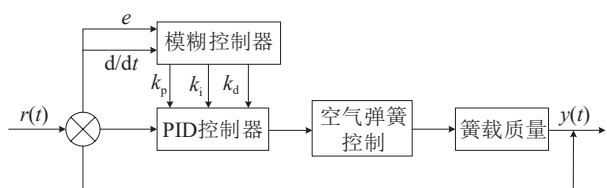


图6 模糊PID控制器

主动悬架中,模糊控制器通过车辆垂向加速度相较于理想加速度的变化值对 $k_p$ 、 $k_i$ 和 $k_d$ 的PID参数进行在线自整定<sup>[26]</sup>。PID控制器的整定公式为

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \omega_i \beta_p \\ k_i = k_{i0} + \omega_i \beta_i \\ k_d = k_{d0} + \omega_i \beta_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: $k_p$ 、 $k_i$ 和 $k_d$ 分别为PID的比例、积分和微分控制因子; $k_{p0}$ 、 $k_{i0}$ 和 $k_{d0}$ 为PID控制器的初始因子; $\omega_i$ ( $i = 1, 2, 3$ )为模糊控制器所确定的对应参数; $\beta_p$ 、 $\beta_i$ 和 $\beta_d$ 为模糊控制器参数的比例因子。

本节所采用的模糊PID控制其控制流程如图7所示。

该控制流程前段与上节的PID控制流程相同,而当空气弹簧控制程序调整至模糊PID控制时,能使车辆在较短的时间内在复杂路面下仍能保持车辆优良的平顺性。

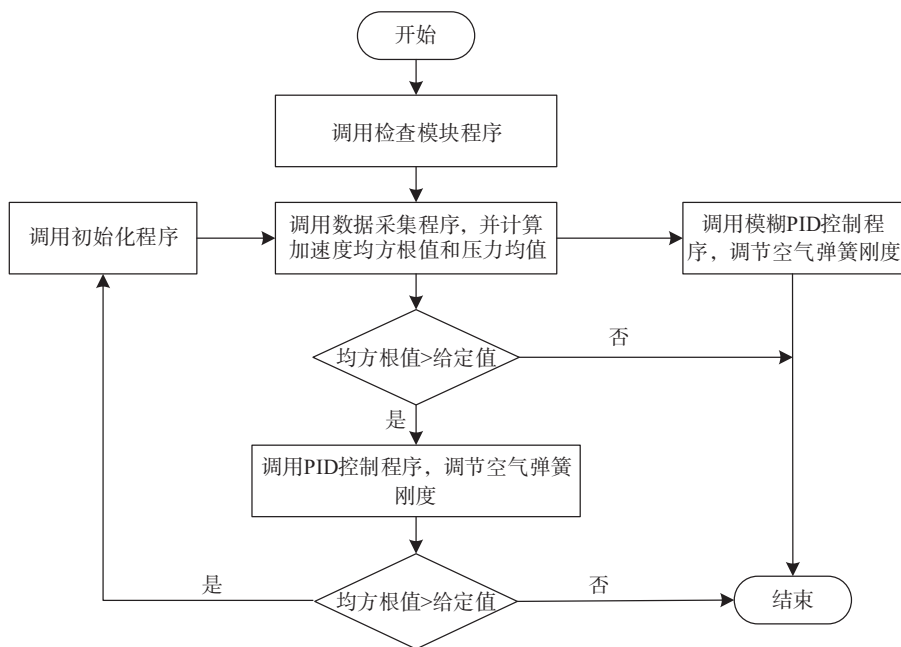


图7 模糊PID控制流程

本节所设置的仿真工况同上节相同,图8为悬架控制前后车身垂向加速度曲线图;图9为悬架所运用的两种控制策略下的车身垂向加速度曲线图。

分析图8可知,在未对悬架施加控制时,车身垂向加速度均方根值为0.0648;加载模糊PID控制器后数值为0.0409。分析图9可以得出,模糊PID控制对车身垂向加速度性能改善为36.8%,且优于PID控制,因此本文所构建的模糊PID控制可以作为主动工作模式的第2阶段。

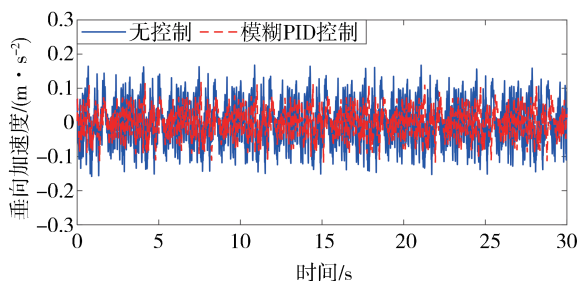


图8 模糊PID下垂向加速度响应对比图

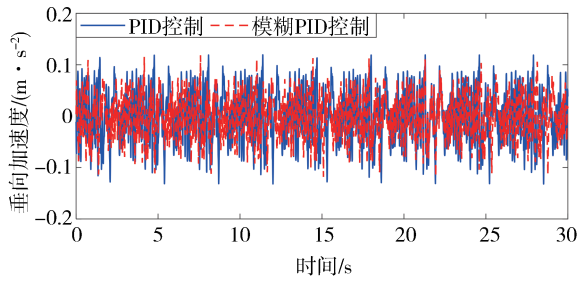


图9 两种控制策略垂向加速度响应对比图

### 3 基于多工况的控制系统设计

#### 3.1 工作模式切换控制

针对复合型悬架系统的两套工作模式,本文制定了工作模式切换控制方案,并对其进行工况验证分析,确保所制定的工作模式切换控制策略可用于复合型悬架系统中。

#### 3.2 工作模式分析

本文构建的复合型悬架系统拥有两种弹性元件,这就使得系统可以拥有从动工作模式(图10)和主动工作模式(图11)两种模式。

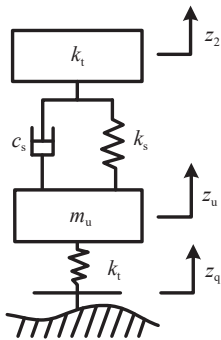


图10 从动工作模式

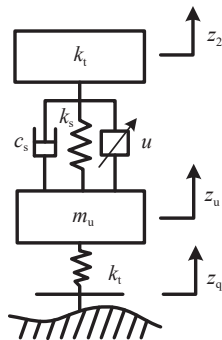


图11 主动工作模式

当复合型悬架采用从动工作模式时,该系统与传统的悬架系统类似。当切换为主动工作模式时,通过不断控制空气弹簧气囊内的气压来控制复合型悬架系统的可变力<sup>[27]</sup>。由于复合型悬架系统具备两套相对独立的工作模式,当空气弹簧发生故障时,可采用从动工作模式,极大地提高了车辆行驶的安全性和稳定性。

本文所设计的复合型悬架工作流程如图12所示,其整体工作过程表述如下。

##### (1)初始从动工作

初始检测复合型悬架系统的工作状态,将其调

整至从动工作模式,而当垂向加速度均方根值大于所给定的人体舒适度标准时,悬架系统进入下一个工作模式。

##### (2)主动工作模式(PID调控)

复合型悬架系统启动空气弹簧调控,用以保证车辆在当前路况下良好的行驶平顺性。同时传感器继续采集当前车辆的加速度值,如果该值仍大于所给定的人体舒适度标准,则空气弹簧调控进入下一个工作模式。

##### (3)主动工作模式(模糊PID调控)

空气弹簧控制程序进入模糊PID控制,通过改变空气弹簧内部气压,使得车辆的垂向加速度得以优化,使车辆的平顺性得以快速改善,使其在复杂路面下保持良好的驾驶体验。

##### (4)结束条件

当车辆在当前工作模式下的垂向加速度值小于所给定的人体舒适度标准时,该调控过程结束。

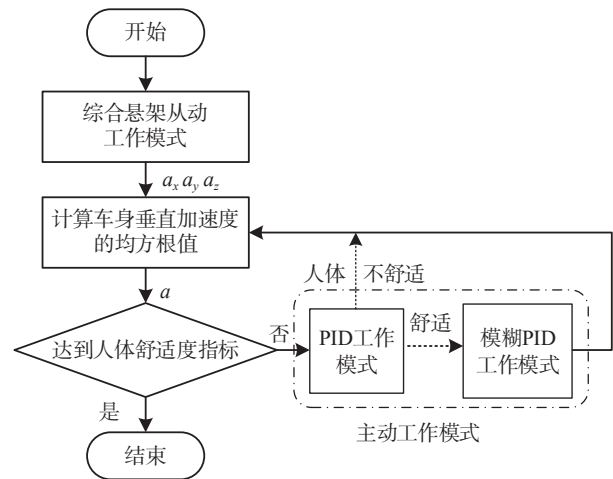


图12 复合型悬架工作流程图

本文为将控制器的启动条件具体化,计算了无控制车辆在B、C、D 3级路面下分别以30、50、70和90 km/h行驶时的垂向加速度均方根值,结果如表1所示。

由表1可以看出,车辆在C级路面30 km/h下的均方根值仍大于B级路面90 km/h,因此本文所设计

表1 多工况下垂向加速度对比表

车速	B级	C级	D级
30 km/h	0.016 7	0.031 0	0.032 9
50 km/h	0.018 9	0.037 8	0.037 9
70 km/h	0.021 6	0.042 4	0.042 7
90 km/h	0.024 9	0.048 2	0.048 3

的复合型悬架系统在B级路面下将采用从动工作模式,而当车辆进入C级路面即此时的车辆垂向加速度均方根值大于0.031 0时采用主动工作模式1阶段,而进入D级路面即均方根值大于0.032 29时采用主动工作模式2阶段。

### 3.3 工作模式切换控制验证

本文基于复合型悬架系统所设计的工作模式切换控制策略,对比传统悬架和现有空气悬架研究现状,在兼顾了空气悬架性能优势和推广效果的基础上,满足了驾驶员的主观意愿,提升控制系统定制化程度。

本节设置仿真条件为B、C、D级组合路面,车辆行驶速度为50 km/h,图13为控制加载前后的车身垂向加速度曲线对比图。

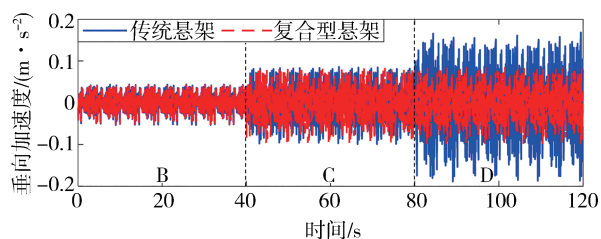


图13 工作模式控制前后垂向加速度响应对比图

分析图13中的数据可得,在未施加控制时,车身垂向加速度均方根值为0.046 1;在加载控制后其数值为0.031 9。由此可得模式切换控制对车身垂向加速度性能有了一定的改善,且改善的幅度为30.8%。

本文为了验证所构建的多工况复合型悬架控制系统的分阶段控制可以降低空气弹簧的工作频率,建立了相应的空气弹簧模型,该模型忽略了空气弹簧在进行控制时气体的运行时间,将空气弹簧的高度变化与有效面积关系曲线进行函数拟合,得到整体空气弹簧系统控制力,如式(9)所示。

$$F = [(p_0 + p_a) \left(\frac{V_0}{V}\right)^\gamma - p_a] (A_0 - \beta x) \quad (9)$$

式中: $p_0$ 表示气囊初始气压; $p_a$ 表示大气压; $V_0$ 表示气囊初始有效容积; $V$ 表示任意时刻气囊容积; $\gamma$ 表示气囊有效容积变化率; $A_0$ 表示气囊有效截面积; $\beta$ 表示气囊内有效面积变化率; $x$ 表示空气弹簧的行程。

本文基于式(9)重新构建了反空气弹簧模型,以 $p_0$ 为因变量,整体空气弹簧系统控制力为自变量,如式(10)所示。

$$p_0 = \left( \left( \frac{F}{(A_0 - \beta x)} + p_a \right) \left( \frac{V_0}{V} \right)^\gamma \right) - p_a \quad (10)$$

基于本节所设置的仿真条件进行空气弹簧工作频率的对比试验,图14所示为全局优化控制和本文所构建的多工况控制下的空气弹簧工作频率响应对比图。

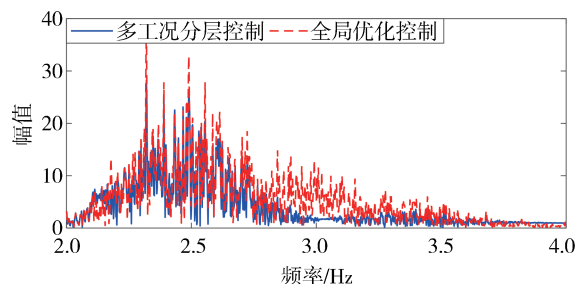


图14 空气弹簧工作频率响应对比图

分析图14可知,本文所构建的多工况控制在高频下的幅值始终低于全局优化控制,其分阶段控制可以有效地降低空气弹簧的工作频率,验证了该系统可以在一定程度上降低空气弹簧的损害,提高空气弹簧的使用寿命。

综上所述,本节所设计的多工况控制策略能够提高车辆行驶时的平顺性的同时,减少空气弹簧的工作损耗。

## 4 硬件在环仿真试验分析

### 4.1 试验流程

本文课题组配有国内高校唯一的VI-Grade紧凑型驾驶模拟器,其可提供的车辆动力学模型精度高且拥有多个子系统,进而可以快速地帮助使用者对车辆的相关参数变量进行实时观测跟踪。本文通过VI-Grade所构建的系统试验测试流程图如图15所示。

首先在MATLAB/Simulink中搭建所需要的车辆整车自由度变量通道,由VI-DriveSim所携带的I/O接口与MATLAB/Simulink中的子模块通道进行匹配。通过匹配相应的自由度变量通道,从而打开对应的I/O接口,利用在Control center中构建的通道实时将车辆数据传输到MATLAB/Simulink中,经过模型计算后将所需控制力的信号传回VI-Grade驾驶模拟器,使控制算法在模拟器中得以实现。

在VI-Grade中,VI-CarRealTime为模拟器仿真

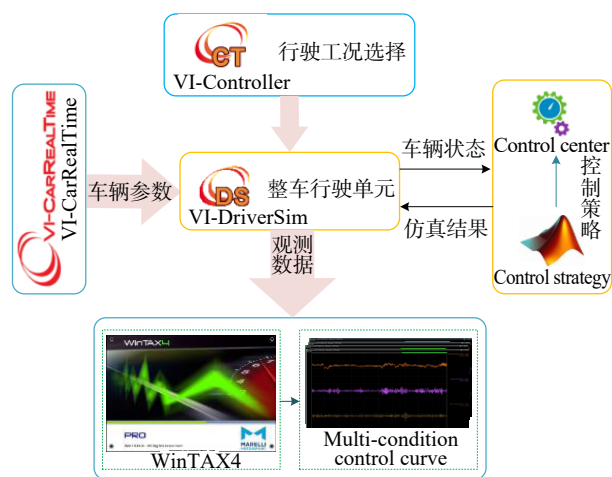


图15 硬件在环试验流程

试验实时提供的车辆模型。VI-CarRealTime将车辆分为车身、悬架等多个子系统,在Control center中设置行驶仿真环境,并在VI-Driversim中选定设置的仿真环境;最后,在VI-Controller中调用驾驶员所需场景。

#### 4.2 测试车辆和行驶工况构建

由于复合型悬架不同于现有的悬架,仅仅修改VI-Grade中的通用车辆模型无法进行本文所设计的系统架构验证,为满足测试需求对所选用的车辆进行悬架系统的重新构建。

本文通过测量复合型悬架的整体结构,将复合弹性元件的数学特性进一步结合进VI-Grade测试模型中,使得整体验证结果更加符合实际。

同时为了测试所设计的复合型悬架系统的平顺性指标,在VI-Grade系统中进行实验路面的组合构建,进而搭建了如图16所示的试验场景和测试车辆。

本文所构建的试验场景包括以下3种工况。

(1) 直线工况:该工况设定车辆在B、C、D 3级组合路面下,分别以30、50、70和90 km/h进行匀速行驶。

(2) 弯道工况:该工况设定车辆以30 km/h的车速在B、C、D 3级组合路面下,车辆分别以转向盘向左转动60°、90°、120°和150°进行工作。

(3) 制动工况:该工况设定车辆在B、C、D 3级路面下,分别加速到30、50、70和90 km/h后进行紧急制动。

#### 4.3 试验结果分析

本文在直线、弯道、制动3种工况下分别对复合



图16 VI-Grade试验场景及测试车辆

型悬架和传统悬架进行仿真分析,对比两者的平顺性评价指标。由于本文所使用的模型为整车模型,而单轮系统的悬架动行程和车轮动载荷无法完整描述其性能,因此本文采用整车的垂向加速度、侧倾角加速度和俯仰角加速度这3项加速度指标来评价车辆的行驶平顺性,并对垂向加速度进行频域角度分析,得到3种工况的平顺性指标对比图。

##### 4.3.1 直线工况

本节仿真工况采用上述的直线仿真工况,并将B、C和D 3级路面组合在一种工况内,制作出了本节所运行的复合工况,其仿真结果如图17~图20所示。

通过横向对比图17中的4个仿真图可以看出,随着车速和路面等级的增加,整车垂向振动信号幅度和振动信号峰值有较为明显的增加,复合型悬架车身垂向振动峰值上升幅值较传统悬架上升幅值小。

由图18可以看出,复合型悬架在人体可感知频段4~8 Hz范围其振动信号的整体数值恒小于传统悬架,且其曲线峰值也小于传统悬架。

由图19可以看出,车辆在行驶过程中,其侧倾角加速度的振幅会随时间逐步提升,当车辆处于B、C级路面时,复合型悬架系统略优于传统悬架系统,当车辆处于D级路面时,复合型悬架系统的改善效果较为明显,而当车辆处于较高车速时,其改善效果尤为明显。

由图20可以看出,在直线工况下行驶时,虽然复合型悬架系统的车身俯仰角加速度有一定的改善,但其性能改善效果相比于垂向加速度和侧倾角加速度的改善效果较差。

通过对比图17~图20可以看出,复合型悬架系统在本章节的评价指标无论是在整体振动幅度还是振动的峰值均较低于传统悬架。

本文提取了图17~图20中的关键参数,进行4

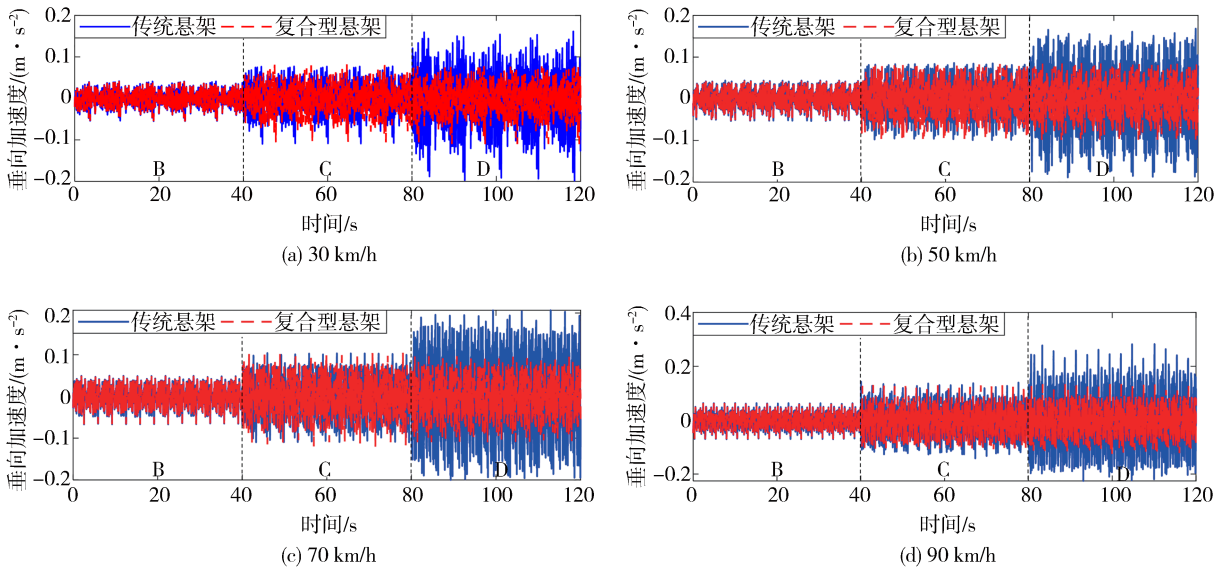


图17 直线工况车身垂直加速度响应对比(时域)

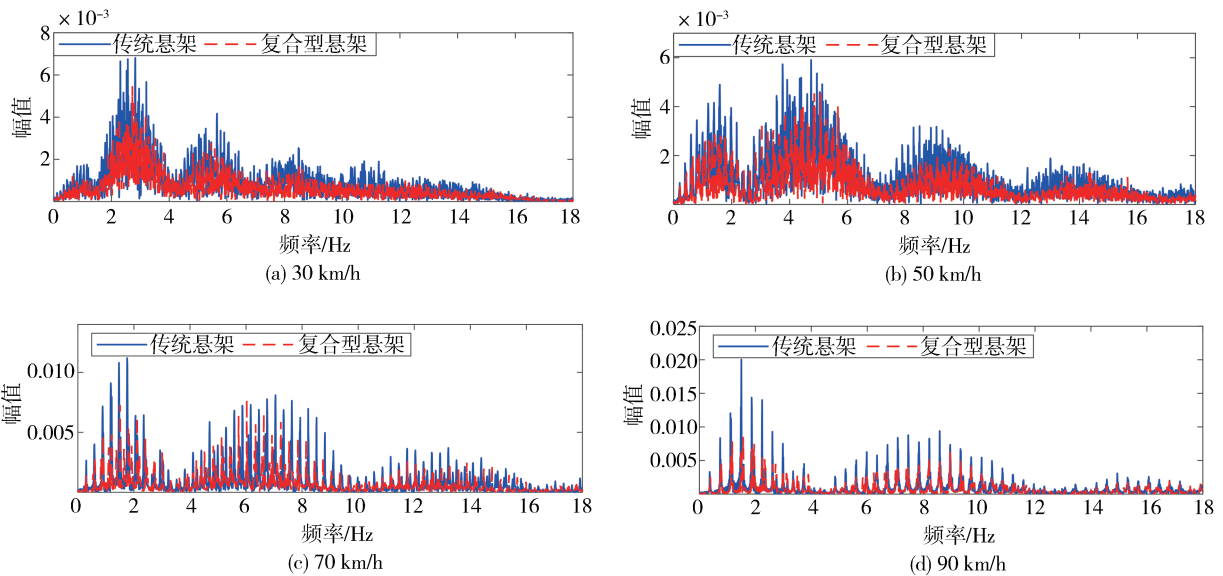


图18 直线工况车身垂直加速度响应对比(频域)

种工况下两种悬架系统的平顺性能对比分析,结果如表2所示。

从表2可以看出:

(1)当车辆在直驶工况下运行时,在车身侧倾加速度、车身俯仰加速度、车身垂向加速度均有不同程度的提高,其提高数值百分比分别为32.26%、37.2%、5.96%。

(2)当车辆在不同车速下行驶时,对比系统的3种评价指标,其性能指标提高的百分比大不相同,其中在较高车速以及较大路面激励的情况下的改善效

果要优于较低车速,较小路面激励的工况。

综上所述,对于复合型的直线工况,复合型悬架系统有着较好的平顺性。

### 4.3.2 弯道工况

本节仿真工况采用上述的弯道仿真工况,其仿真结果如图21~图24所示。

通过对比图21中的4组仿真曲线可以看出,随着转向盘转角和路面等级的增加,整车垂向振动信号幅度和振动信号峰值有较为明显的增加,复合型悬架车身垂向振动信号峰值上升幅值较传统悬架上

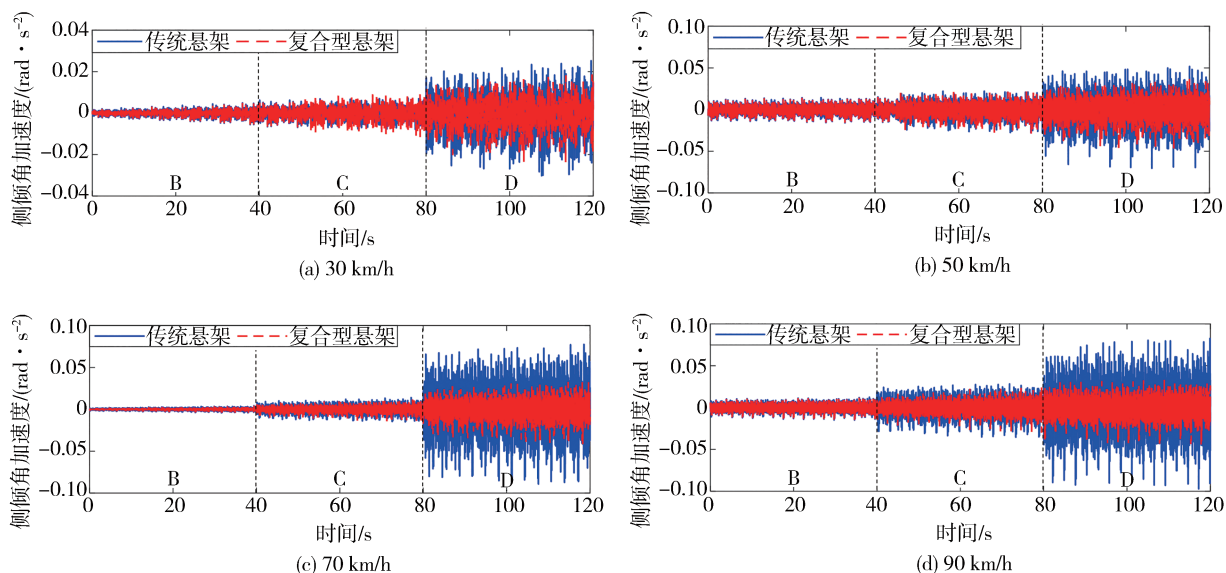


图19 直线工况侧倾角加速度响应对比

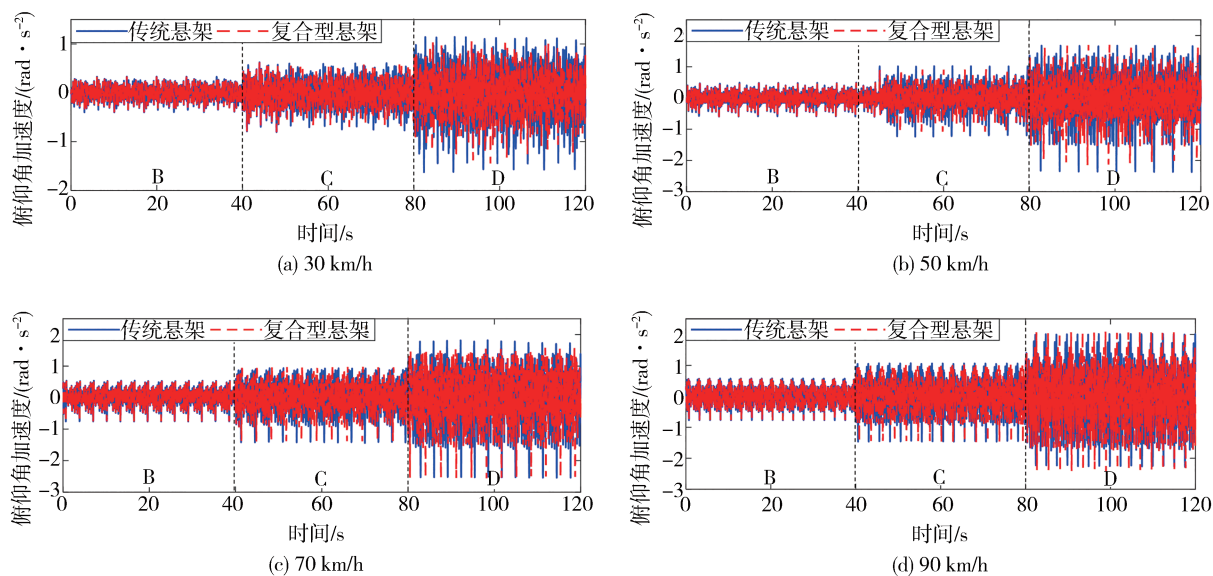


图20 直线工况俯仰角加速度响应对比

表2 直线工况平顺性能对比

车速	悬架类型	车身垂向加速度 均方根值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	性能改善/%	车身侧倾角加速度 均方根值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	性能改善/%	车身俯仰角加速度 均方根值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	性能改善/%
30 km/h	传统悬架	0.039 7	30.47	0.004 8	18.75	0.329 6	12.59
	复合型悬架	0.027 6		0.003 9		0.288 1	
50 km/h	传统悬架	0.046 1	30.80	0.011 0	23.63	0.429 1	5.57
	复合型悬架	0.031 9		0.008 4		0.405 2	
70 km/h	传统悬架	0.053 7	34.63	0.014 8	56.75	0.500 7	2.98
	复合型悬架	0.035 1		0.006 4		0.485 8	
90 km/h	传统悬架	0.060 9	33.17	0.015 9	49.69	0.549 0	2.68
	复合型悬架	0.040 7		0.008 0		0.534 3	

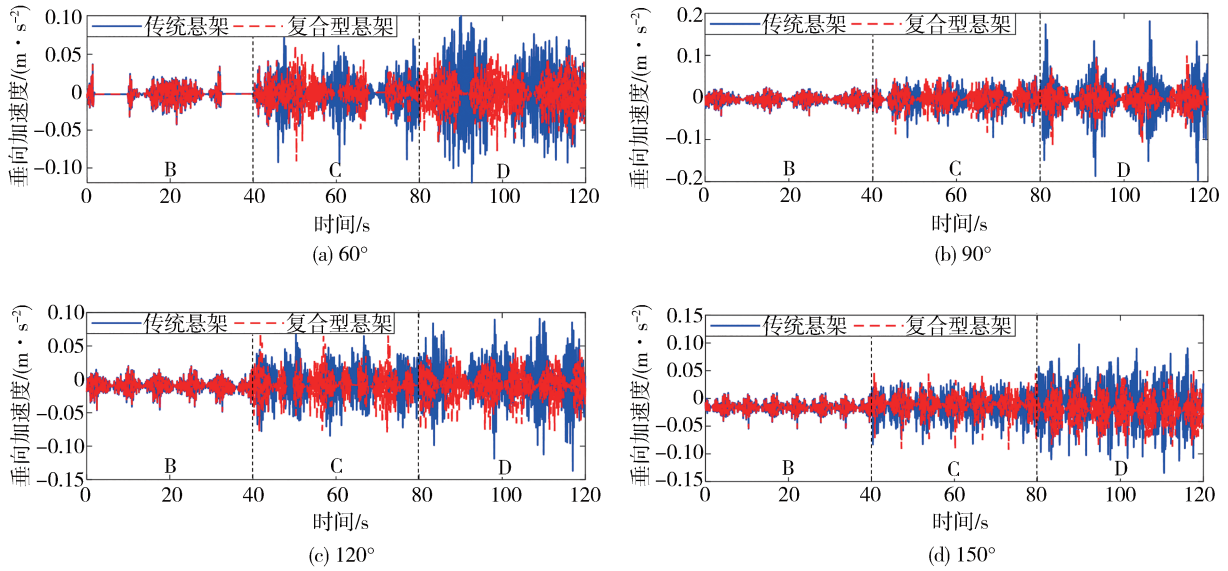


图21 弯道工况车身垂直加速度响应对比(时域)

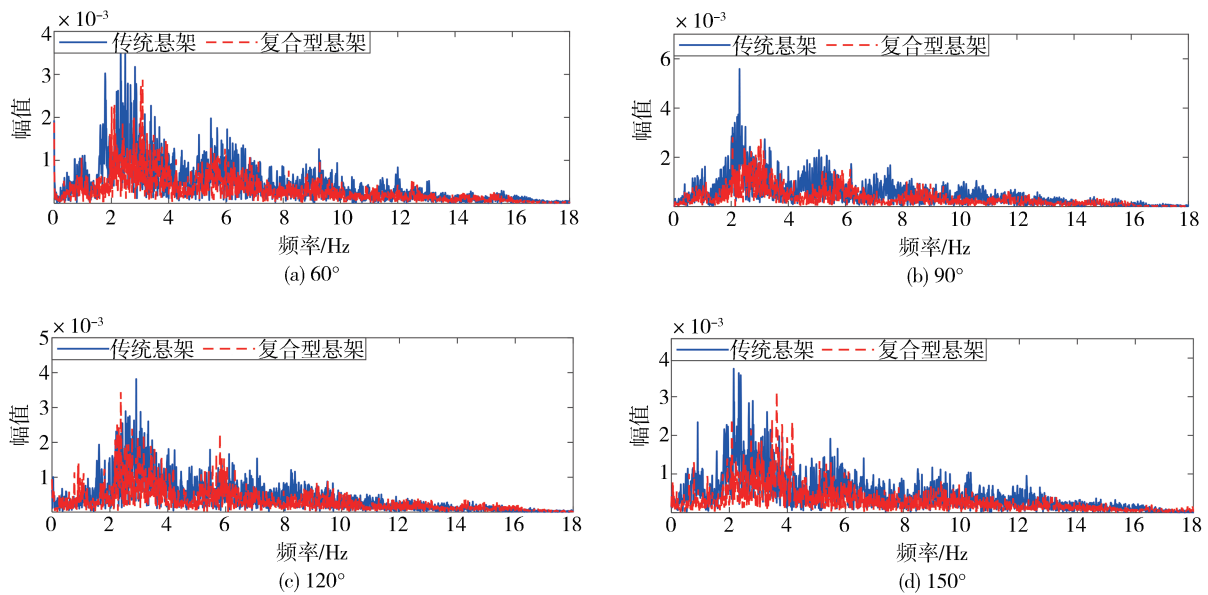


图22 弯道工况车身垂直加速度响应对比(频域)

升幅值小。

由图22可以看出,复合型悬架在人体可感知频段4~8 Hz范围内其整体数值恒小于传统悬架。

由图24可以看出,在整体的弯道工况下,车身俯仰角加速度在转向盘转角较小时的改善效果较好,在转向盘转角较大时改善效果较差,但总体上仍优于直线工况。

通过对比图21~图24可以看出,复合型悬架系统在本章节的评价指标无论是在整体振动信号幅度

还是振动信号的峰值均较低于传统悬架。

本文对图21~图24中的参数进行整定,进行了4种工况下两种悬架系统平顺性能对比分析,结果如表3所示。

从表3可以看出:

(1)当车辆在转弯工况下运行时,在车身侧倾加速度、车身俯仰加速度、车身垂向加速度均有着不同程度的提高,提高的平均百分比分别为23.77%、22.22%、25.10%。

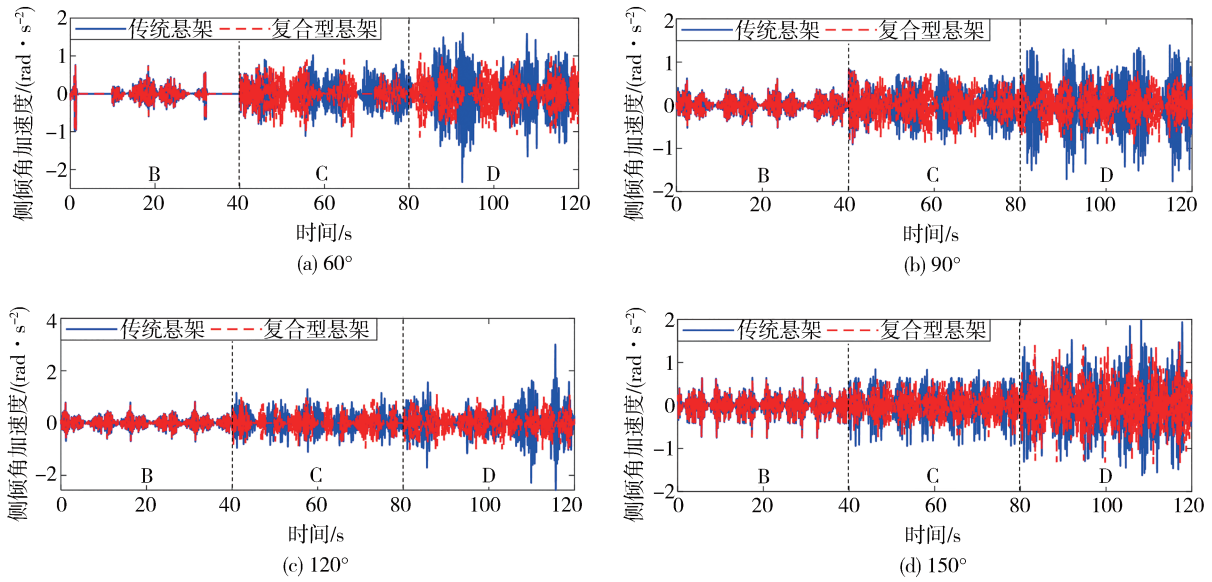


图23 弯道工况侧倾角加速度响应对比

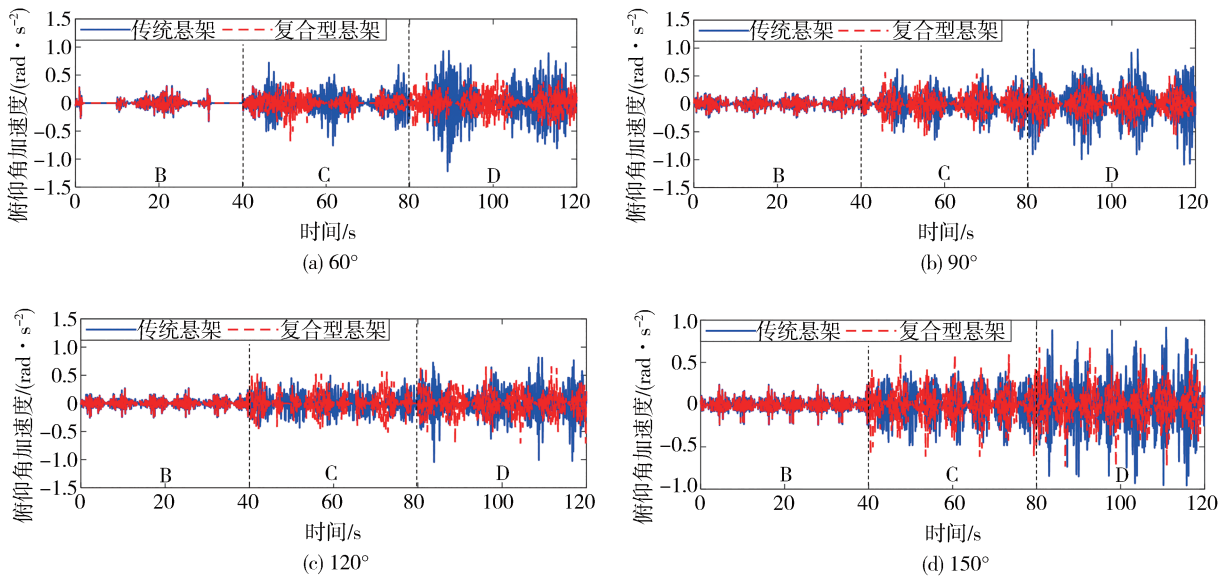


图24 弯道工况俯仰角加速度响应对比

表3 弯道工况平顺性能对比

转向盘转角	悬架类型	车身垂向加速度均方根值/(m·s <sup>-2</sup> )	性能改善/%	车身侧倾角加速度均方根值/(m·s <sup>-2</sup> )	性能改善/%	车身俯仰角加速度均方根值/(m·s <sup>-2</sup> )	性能改善/%
60°	传统悬架	0.020 6	29.61	0.315 4	22.99	0.169 1	34.00
	复合型悬架	0.014 5		0.242 9		0.111 6	
90°	传统悬架	0.024 1	30.29	0.315 6	25.57	0.181 9	32.55
	复合型悬架	0.016 8		0.234 9		0.127 7	
120°	传统悬架	0.023 0	22.61	0.326 7	25.25	0.146 3	11.28
	复合型悬架	0.017 8		0.244 2		0.129 8	
150°	传统悬架	0.025 5	12.55	0.339 7	15.07	0.172 5	22.55
	复合型悬架	0.022 3		0.288 5		0.133 6	

(2)当车辆在不同转向盘转角下行驶时,对比系统的3种评价指标,其性能指标提高的百分比大不相同,其中复合型悬架系统在整体弯道工况下在转向盘转角为 $90^\circ$ 时改善效果最好。

### 4.3.3 制动工况

本节仿真工况采用上文的制动仿真工况,由于在制动工况下车身侧倾加速度和车身俯仰加速度对于车辆的影响较小,本节的平顺性评价指标将仅采用车身垂向加速度,因为本节所采用的工况为制动工况,所以车辆的稳定时间会随着工况的不同而改

变,因此本节的仿真时间均为不同工况下的制动时间,其仿真结果如图25~图27所示。

通过图25~图27中可以看出复合型悬架在紧急制动时可以更快地达到车辆平稳,提高了车辆在制动时的安全性,大大提高了复合型悬架的实用价值。

综上所述,对比图25~图27可知,在制动工况中,复合型悬架相比于传统悬架,在车身垂向加速度的优化方面有着显著优势。本节提取了图25~图27中的关键参数,如表4所示。

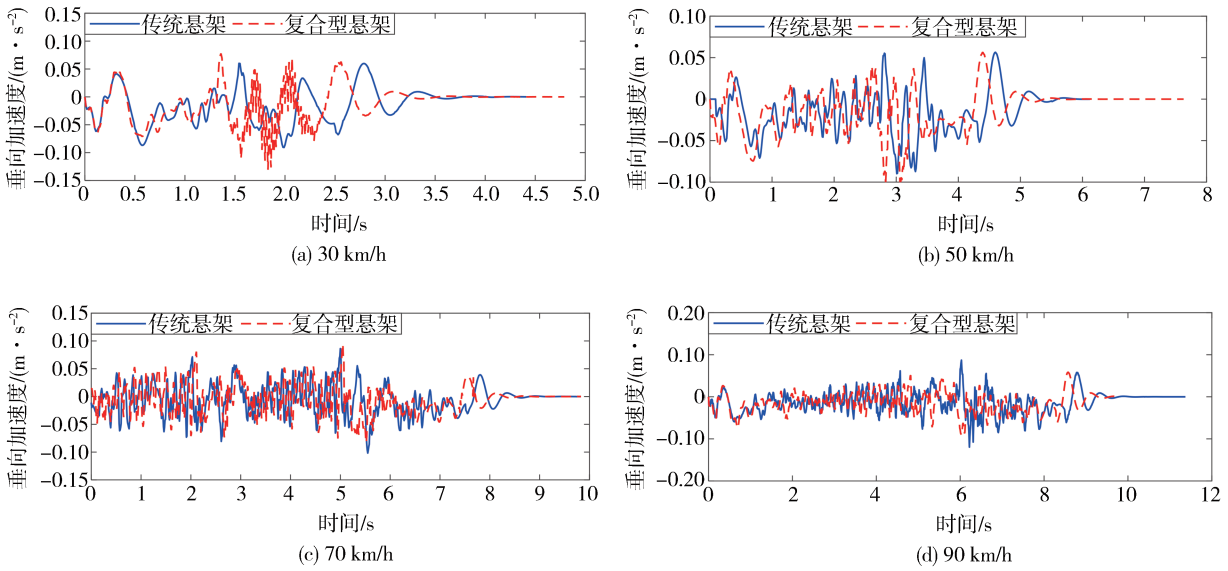


图25 制动工况B级路面车身垂直加速度响应对比

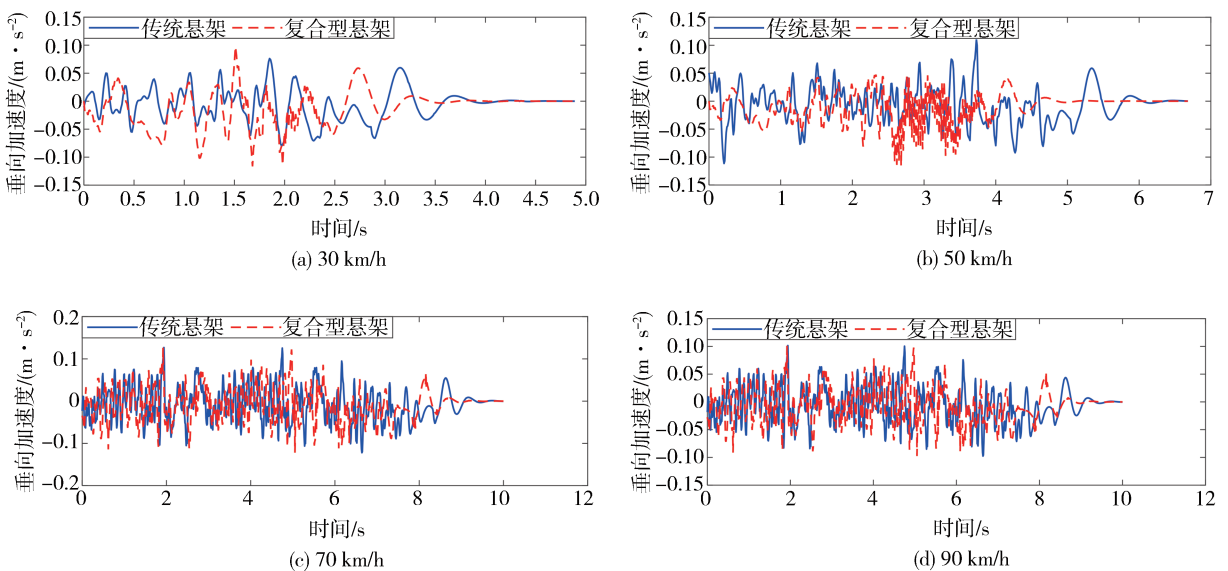


图26 制动工况C级路面车身垂直加速度响应对比

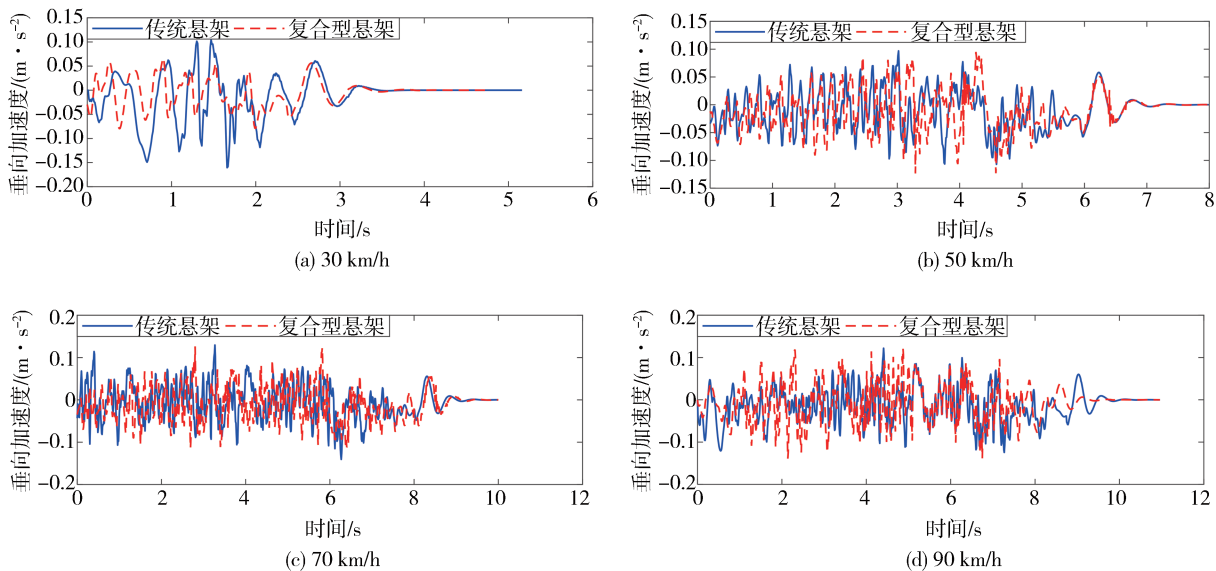


图27 制动工况D级路面车身垂直加速度响应对比

表4 制动工况平顺性能对比

车速	悬架类型	B级路面车身垂向 加速度均方根值/( $m \cdot s^{-2}$ )	性能 改善/%	C级路面车身垂向 加速度均方根值/( $m \cdot s^{-2}$ )	性能 改善/%	D级路面车身垂向加速 度均方根值/( $m \cdot s^{-2}$ )	性能 改善/%
30 km/h	传统悬架	0.034 0	2.35	0.034 8	2.59	0.045 1	23.72
	复合型悬架	0.033 2		0.033 9		0.034 4	
50 km/h	传统悬架	0.030 4	8.22	0.032 7	11.93	0.037 2	2.96
	复合型悬架	0.027 9		0.028 8		0.036 1	
70 km/h	传统悬架	0.027 9	2.88	0.041 0	3.66	0.040 8	1.23
	复合型悬架	0.027 1		0.039 5		0.040 3	
90 km/h	传统悬架	0.028 6	1.75	0.032 8	3.65	0.043 7	1.60
	复合型悬架	0.028 1		0.031 6		0.043 0	

从表4可以看出:

(1)当车辆在制动工况下运行时,车身垂向加速度均有着不同程度的提高,其提高的平均百分比分别为3.8%、5.46%、7.38%。仿真试验结果表明,复合悬架优于传统悬架,其中在D级路面下的改善情况更好。

(2)当车辆在不同车速下行驶时,对比系统的评价指标,其性能指标提高的百分比大不相同,其中复合型悬架的在B、C级路面下车速为50 km/h时车身垂向加速度改善效果较好,而在D级路面下的改善效果较差。

## 5 结论

本文采用MATLAB仿真软件和VI-Grade试验平台,通过构建3种车辆行驶工况,对传统悬架和复

合型悬架进行了平顺性指标的分析,并对其进行了数据处理分析,得出如下结论。

(1)构建了基于不同工况的复合悬架控制策略,验证了本课题所使用的控制策略可以有效优化行驶平顺性;而分阶段的控制策略,在优化了平顺性的同时降低了空气弹簧的工作频率。

(2)通过VI-Grade紧凑型驾驶模拟器构建3种仿真工况,试验并计算了复合型悬架对于平顺性的改善效果分别达到了32.26%、23.77%和7.38%,结果表明所提出的系统可以有效改善车辆行驶时的平顺性,且在直线工况下效果更好。

(3)但本文在研究的过程中也发现,空气弹簧的损耗未能得到具体数值。后续本文的研究团队将进行空气弹簧的损耗试验,并将性能改善率与所增加的空气弹簧系统成本进行对比,用以进一步验证复合型悬架系统的实用性。

## 参考文献

- [1] 刘岸泽. 我国汽车软件发展渐入佳境[J]. 智能网联汽车, 2022, 5(1): 37-39.  
LIU Anze. Development of automobile software in our country is gradually getting better [J]. Intelligent Connected Vehicles, 2022, 5(1): 37-39.
- [2] 余志生. 汽车理论[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
YU Zhisheng. Elementary vehicle dynamics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [3] LIU L, LI X, LIU Y J, et al. Neural network based adaptive event trigger control for a class of electromagnetic suspension systems[J]. Control Engineering Practice, 2021, 106: 104675.
- [4] LI Y, YANG X, SHEN Y, et al. Optimal design and dynamic control of the HMDV inertial suspension based on the ground-hook positive real network [J]. Advances in Engineering Software, 2022, 171: 103171.
- [5] LIU J, ZHUANG D J, YU F, et al. Optimized design for a MacPherson strut suspension with side load springs [J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9: 29-35.
- [6] AB TALIB M H, MAT DARUS I Z, MOHD SAMIN P, et al. Vibration control of semi-active suspension system using PID controller with advanced firefly algorithm and particle swarm optimization [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12: 1119-1137.
- [7] ZHANG J, YANG Y, HU C. An adaptive controller design for nonlinear active air suspension systems with uncertainties [J]. Mathematics, 2023, 11(12): 2626.
- [8] 张健文, 庄德军, 林逸, 等. 汽车用空气弹簧悬架系统综述 [J]. 公路交通科技, 2002(6): 151-155.  
ZHANG Jianwen, ZHUANG Dejun, LIN Yi, et al. Survey of automotive air spring suspension system [J]. Journal of Highway and Transportation Research, 2002(6): 151-155.
- [9] 徐明, 黄庆生. 车辆半主动悬架智能控制方法研究现状 [J]. 机床与液压, 2021, 49(1): 169-174.  
XU Ming, HUANG Qingsheng. Research status of intelligent control method for vehicle semi-active suspension [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(1): 169-174.
- [10] LEI Jing, LI Tongxing. Nonlinear optimal internal-model control for multiple time-delay systems with application to vehicle suspensions [J]. Integrated Ferroelectrics, 2020, 207(1).
- [11] 曹艳玲, 张琦. 自适应神经模糊推理的四轮转向车辆转向控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2021(3): 224-228, 233.  
CAO Yanling, ZHANG Qi. Research on steering control of four-wheel steering vehicle based on adaptive neuro-fuzzy system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(3): 224-228, 233.
- [12] NAZEMIAN H, MASIHI-TEHRANI M. Hybrid fuzzy-PID control development for a truck air suspension system [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2020, 13(1): 55-70.
- [13] FOUAD Giri, KHALID El Majdoub, FATIMA-ZAHRA Chaoui. Adaptive backstepping control design for semi-active suspension of half-vehicle with magnetorheological damper [J]. Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(3): 582-596.
- [14] AL AELA A M, KENNE J P, MINTSA H A. Adaptive neural network and nonlinear electrohydraulic active suspension control system [J]. Journal of Vibration and Control, 2022, 28 (3-4): 243-259.
- [15] YIN Y, LUO B, REN H, et al. Robust control design for active suspension system with uncertain dynamics and actuator time delay [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36 (12): 6319-6327.
- [16] 张丽霞, 李宁斐, 梁冠群, 等. 阻尼连续可调半主动悬架平滑天棚控制策略研究 [J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 169-173, 184.  
ZHANG Lixia, LI Ningfei, LIANG Guanqun, et al. Research on smooth skyhook control strategy of semi-active suspension with continuously adjustable damping [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 169-173, 184.
- [17] 许力, 曹青松, 张定军. 基于量子粒子群算法的主动悬架分数阶控制策略 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 227-233.  
XU Li, CAO Qingsong, ZHANG D J. Fractional order control strategy of active suspension based on QPSO [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 227-233.
- [18] 汪少华, 翟旭辉, 孙晓强, 等. 车辆刚度阻尼多级可调式油气悬架系统分析及控制研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(12): 168-177.  
WANG Shaohua, ZHAI Xuhui, SUN Xiaoqiang, et al. Analysis and control of a vehicle hydro pneumatic suspension system with multistage adjustable stiffness and damping characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(12): 168-177.
- [19] 于文浩. 车辆互联空气悬架系统协同控制方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
YU Wenhao. Research on the cooperative control method of vehicle interconnected air suspension system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [20] 张学臣. 牵引车电控空气悬架控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
ZHANG Xuecheng. Research on control strategy of electronically controlled air suspension for tractor [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [21] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述 [J]. 自动化学报, 2000(3): 347-355.  
WANG Wei, ZHANG Jingtao, CHAI Tianyou. A survey of advanced PID parameter tuning methods [J]. Acta Automatica Sinica, 2000(3): 347-355.
- [22] 鲍卫宁. 汽车空气悬架及其控制系统动力学仿真分析研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
BAO Weining. Research on the modeling and dynamic simulation of the air suspension and its control system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

- [21] LYU H, YANG K, HUANG X T, et al. Uncertainty and correlation propagation analysis of powertrain mounting systems based on multi-ellipsoid convex model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 173: 109058.
- [22] 周子琨, 夏二立, 陈梓铭, 等. 考虑被动侧动刚度的动力总成悬架传递率优化[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(1): 74-79.  
ZHOU Z K, XIA E L, CHEN Z M, et al. Vibration transmissibility optimization of powertrain mounts considering passive-side dynamic stiffness [J]. *Noise and Vibration Control*, 2020, 40(1): 74-79.
- [23] 李汶哲, 毛海宽, 吕辉. 电动车动力总成悬架系统的可靠性分析方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(4): 55-64.  
LI W Z, MAO H K, LYU H. A reliability analysis method for powertrain mounting systems of electric vehicles [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2023, 50(4): 55-64.
- [24] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.  
PANG J. NVH control of automobile body [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [25] 张赣波, 赵耀. 反共振双层隔振系统分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15): 29-35, 70.  
ZHANG G B, ZHAO Y. Analysis of anti-resonant two-stage isolation system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 29-35, 70.
- [26] TRUONG N H, DAO D N. New hybrid approach HNSGA-III&SPEA/R: application to optimization of powertrain mount system stiffness parameters[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2021, 40(4): 1976-1992.
- [27] YAO J C, FARD M, DAVY J L, et al. The prediction of vehicle vibration transmitted to the occupant using a modular transfer matrix [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2022, 28(13-14): 1698-1711.
- [28] ŠVEC J G, GRANQVIST S. Tutorial and guidelines on measurement of sound pressure level in voice and speech [J]. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2018, 61(3): 441-461.
- [29] 兰华. 永磁同步电机的电磁力波与电磁振动研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
LAN H. Research on electromagnetic force waves and electromagnetic vibration of PMSMS [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

(上接第 2090 页)

- [23] 王刚, 李昆鹏, 景晖, 等. 基于Q学习的整车主动悬架免参数  $H_{\infty}$  控制[J]. *汽车工程*, 2023, 45(12): 2260-2271.  
WANG Gang, LI Kunpeng, JING Hui, et al. Parameter-free  $H_{\infty}$  control of vehicle active suspension based on Q-learning [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(12): 2260-2271.
- [24] 王大勇, 王慧. 基于变论域模糊控制的车辆半主动悬架控制方法[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(3): 366-372.  
WANG Dayong, WANG Hui. Control method of vehicle semi active suspension based on variable universe fuzzy control [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(3): 366-372.
- [25] 吴晓, 史文库, 陈志勇. 基于交互式多模型卡尔曼滤波的主动悬架控制[J]. *汽车工程*, 2023, 45(7): 1200-1211, 1253.  
WU Xiao, SHI Wenku, CHEN Zhiyong. Active suspension control based on interacting multiple model Kalman filter [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(7): 1200-1211, 1253.
- [26] LIAO Xiangping, YANG Shuai, HU Dong, et al. Control performance improvement of hydro-viscous clutch based on fuzzy-PID controller [J]. *Energies*, 2021, 14(24).
- [27] 孙文, 李晨阳, 王军年, 等. 越野车复合型悬架平顺性的研究 [J]. *汽车工程*, 2022, 44(1): 105-114, 122.  
SUN Wen, LI Chenyang, WANG Junnian, et al. Research on ride comfort of an off-road vehicle with compound suspension [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(1): 105-114, 122.