

电控空气悬架阻尼分频混合控制策略研究

潘公宇¹ 杜曾龙²

(1. 江苏大学车辆产品实验室 镇江 212013; 2. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 针对提高乘坐舒适性的需求以及依靠单一控制算法存在局限性的现象,本文给出了一种算法结构简易,性能高效,应用成本较低的电控空气悬架阻尼分频混合控制方法。首先是设计了一种变指数天棚控制,仿真表明,其在低频段控制效果较好且比传统天棚更优,其次是对 LQG 控制进行设计,并利用遗传粒子群算法对 Q, R 矩阵进行寻优,使其获得全局最优解,根据分析表明,其在高频区域控制效果较好且算法成熟稳定,然后通过高低频分频的方式对两者进行融合,实现对电控空气悬架阻尼在全频段的分频联合控制。最后搭建了基于 MATLAB/Simulink 平台的 1/4 车电控空气悬架仿真模型和基于 U2 快速控制原型和 dSPACE/Simulator 实时仿真器的硬件在环实验平台(HIL),采用随机路面工况进行仿真和实验验证,实验结果表明,使用变指数天棚分频混合控制比 LQR 控制效果更好,较被动悬架和 SH-ADD 混合控制,车身加速度分别下降了 15.53% 和 6.42%,在全频段取得较好的控制效果,充分提高了乘坐舒适性。

关键词: 变指数天棚;遗传粒子群算法;电控空气悬架;平顺性

中图分类号: U463.33;TN609 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.2010

Research on hybrid control strategy for damping frequency division of electronically controlled air suspension

Pan Gongyu¹ Du Zenglong²

(1. Vehicle Product Laboratory, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the need of improving ride comfort and the limitation of relying on a single control algorithm, this paper presents a hybrid control method with simple structure, high performance and low application cost. Firstly, a variable index ceiling control is designed, and the simulation shows that the control effect is better in the low frequency band and better than the traditional ceiling. Secondly, the LQG control is designed, and the Q and R matrix is optimized by genetic particle swarm optimization algorithm to obtain the global optimal solution. According to the analysis, the control effect is better in the high frequency region and the algorithm is mature and stable. Then the two are fused by the way of high and low frequency division to realize the joint control of the electric controlled air suspension damping in the full frequency band. Finally, a simulation model of 1/4 car electronic control air suspension based on MATLAB/Simulink platform and a hardware-in-the-loop experiment platform (HIL) based on U2 rapid control prototype and dSPACE/Simulator real-time simulator are built. Simulation and experimental verification are carried out under random road conditions. Compared with passive suspension and SH-ADD hybrid control, the acceleration of the body decreases by 15.53% and 6.42%, respectively, which achieves better control effect in the whole frequency band and fully improves the ride comfort.

Keywords: variable index skyhook; genetic particle swarm optimization; electrically controlled air suspension; ride

0 引言

电子控制的空气悬架系统可以灵活实现车身高度与悬架软硬调整,因为其可调节空气弹簧的刚度与减振器的阻

尼,因此广受青睐^[1],其设计制造^[2]及控制算法的开发应用也逐渐成为领域内的热点,在改善乘坐舒适性方面,相关阻尼控制算法的研究更是其中之重^[3]。为此,许多国内外研究者都深入探索了悬架阻尼控制技术的相关领域。比较经

典的控制算法有天棚阻尼控制^[4](skyhook control, SH)、地棚阻尼控制^[5](groundhook control, GH)、加速度阻尼^[6](acceleration driven damper, ADD)控制等,这一类的控制方法往往基于特定的理想化假设,控制目标单一,控制适用的工况也有一定的局限性,如 SH 适用于低频段,在高频时反而会产生恶化的效果,ADD 在高频段效果较好,低频段效果不如被动悬架。也有以传统控制理论作为基础的 PID^[7]控制、LQR 控制、滑模控制^[8]等控制算法。此类方法原理简单易懂,具有良好的控制效果,但高度依赖于参数的选择及滑模面和切换函数的设计,选取不当,可能产生较大的误差。近年来,逐渐出现了基于现代控制方法的模型预测控制^[9],模糊控制^[10],使用机器学习预测、神经网络优化等的电控空气悬架控制方法,此类方法控制效果较好,但算法结构复杂,实际应用时计算量大,成本较高。各控制方法都具有其优势和劣势,因此,结合不同的控制算法或采取不同的优化方式,实现优势互补是悬架控制算法发展的一个趋势^[11]。郭孔辉等^[12]提出了一种改进的加速度阻尼控制方法(SH-ADD),结合了 SH 和 ADD,在全频段都拥有较好的控制效果;李志清等^[13]提出了一种用遗传算法(genetic algorithm, GA)优化的模糊 PID 控制,有效改善了车辆的舒适性,但算法参数调整复杂;寇发荣等^[14]提出一种基于神经网络优化的多模式切换终端滑模控制,可有效的协调车高调节与悬架阻尼,提高了车辆在复杂工况下的平顺性,但其依赖于事先通过神经网络优化的滑模控制调试出不同工况的最佳阻尼进行切换,算法结构复杂,计算成本高,调试困难;Zhu 等^[15]提出了一种结合有监督深度学习预测控制,采用监督式深度学习(YOLOv3)方法和利用传感器和摄像头来识别瞬态道路从而进行预测控制,能够有效地抑制垂向振动,具有较好的控制效果,但其对软件和硬件要求高,实际应用成本高。

综上,单一的控制算法一般有其局限性,往往在某一工况下效果较好,其他工况控制效果不好,甚至导致结果的恶化,难以满足多工况下的控制需求。一些结合各自优势进行互补的混合控制算法或采用先进优化方式的现代控制方法确实可以弥补单一控制算法的局限性,实现对不同工况的适应性,提高控制性能,但也面临着系统设计及参数调整复杂,对软件和硬件要求高,实时计算应用成本高,调试和维护困难等挑战。从提高乘坐舒适性角度考虑,在垂直振动方面,人体更容易感受到低频振动带来的不适。因此,考虑是否能通过分频的方式先区分高低频,通过分析不同控制算法适用的频段,结合各自特点,设计一种在低频段和高频段控制效果都较好且算法并不复杂,实时计算应用成本较低的分频融合控制算法,从而实现全频段的有效控制,解决单一算法的不足之处和部分混合控制算法结构复杂,应用成本高等问题。

基于上述分析和解决思路,本文先是设计了一种变指数天棚控制,其算法原理简易有效,尤其在低频段控制效果

较好且比传统天棚控制更优,而 LQG 在高频段具有较好的控制效果,且算法成熟易行,但考虑到 LQG 控制中比较依赖于 Q 、 R 矩阵的调节,一般使用经验法或使用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)进行优化^[16],容易出现恶化,因此设计了一种使用遗传粒子群(genetic algorithm particle swarm optimization, GAPSO)进行优化的 LQG 控制算法,搜索全局最优解,获得较好的控制效果,虽具有一定计算量,但尚可接受,结合两者优点,通过分频的方式,实现了一种高效易行的分频混合控制,有效地提高了乘坐舒适性,减小了应用成本,最后通过与其他混合控制算法进行比较仿真和硬件在环实验来验证其效果。

1 电控空气悬架系统模型建立

图 1 详述了文中探讨的电控空气悬架的主体构造,它采用一体化设计,主要包括膜式空气弹簧与电磁阀减振器两个关键组件,它们被稳定地配置于车身与车轮之间,以实现振动吸收与悬架控制。

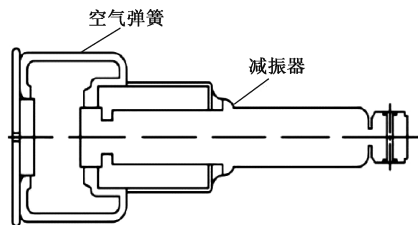


图 1 电控空气悬架结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of electrically controlled air suspension

电磁阀减振器的阻尼特性受节流孔开启程度直接影响,通过精确调控悬架电控系统的输入电流,能够调整节流阀开度,从而精细地改变阻尼效果,节流孔开启增大,阻尼作用减弱;反之,减小则增强。

本文选择了一个简化的二自由度悬架模型进行仿真实验,其动力学模型如图 2 所示,这种简化模型为本文研究提供了一个有效的工具来深入研究不平路面下悬架的振动响应及其控制策略。通过应用牛顿的运动定律,该振动系统垂直运动方程^[17]为:

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + k_s(x_s - x_u) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) - F = 0 \\ m_u \ddot{x}_u - k_s(x_s - x_u) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_t(x_u - x_r) + F = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_t 为轮胎刚度; c_s 为悬架的基值阻尼系数; k_s 为悬架刚度; m_u 为簧下质量; m_s 为簧上质量; x_r 为路面的垂向位移输入; x_s 为簧上质量的垂直位移; x_u 为簧下质量的垂直位移; F 为可控阻尼力。

2 电控空气悬架阻尼控制策略研究

2.1 变指数天棚控制设计

近年来,人们对改进汽车的悬架系统有相当大的兴趣。由于乘客座椅运动由主动或半主动悬架控制,使乘客的加

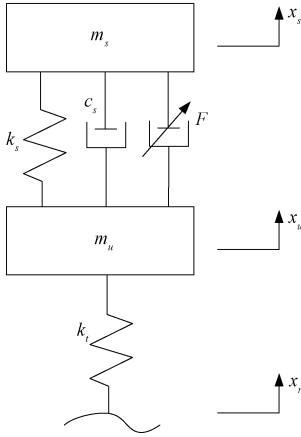


图 2 1/4 车悬架模型

Fig. 2 1/4 car suspension model

速度最小化,从而提高了乘客的舒适性,由于整个系统是耗散的,传统的天棚控制难以实现乘坐舒适度提升与悬挂行程限制的双重精确控制。本文提出了一种变指数天棚阻尼器来协调控制上述两个目标,依据簧载质量与非簧载质量的相对悬架行程,实施精细的阻尼调控。从而最小化簧载质量加速度且将相对悬架行程保持在规定的限值之间,增强了乘坐舒适性、抓地性和更好的悬架动行程。

振动空间是弹簧承载质量和非弹簧承载质量之间最大相对位移的距离衡量,用 L_{\max} 表示:

$$L_{\max} = |x_s - x_u|_{\max} \quad (2)$$

相对悬架偏转是弹簧承载质量和非弹簧承载质量之间的相对位移距离 $L = |x_s - x_u|$ 与振动空间 L_{\max} 的比率。相对悬架偏转需恒小于 1,用 ϵ 表示:

$$\epsilon = \frac{L}{L_{\max}} \quad (3)$$

目标优化的控制律设计着重提升车辆行驶平稳性、抓地力及悬挂系统的动态响应。为此,模型中引入了可变阻尼器,其运作策略直接针对相对悬架行程的变化,从而有效兼顾并优化了上述所有性能指标。 ϵ 继续增加的瞬间,动态阻尼力呈现出连续衰减的趋势。鉴于乘坐的舒适度和相对悬架偏转 ϵ 在本质上相悖,可变阻尼器巧妙地调整其阻尼系数,旨在同时优化行驶平稳性和悬架响应,确保路面适应性出色。

$$c_{sky} = c_s \times e^{-k_1 \times \epsilon} \quad (4)$$

式中: c_{sky} 是天棚阻尼系数; c_s 是基值阻尼; ϵ 是相对悬架偏转; k_1 是用户依据需求选定的一个常数,以调整阻尼系数,一般取 0.5。

阻尼控制力输出 U 为:

$$U = -c_{sky} \times \dot{x}_s \quad (5)$$

式中: \dot{x}_s 是簧载质量加速度。

2.2 遗传粒子群优化 LQG 控制设计

针对本文探讨的控制策略,创新性地设计并实现了融

合 GA 与 PSO 的优化线性二次高斯(LQG)控制,简称为 GAPSO-LQG 控制。此系统架构包括两大部分:一是悬架 LQG 控制器^[18],二是权重系数优化模块。其工作机理直观展示于图 3 中,具体 LQG 控制器设计过程为:

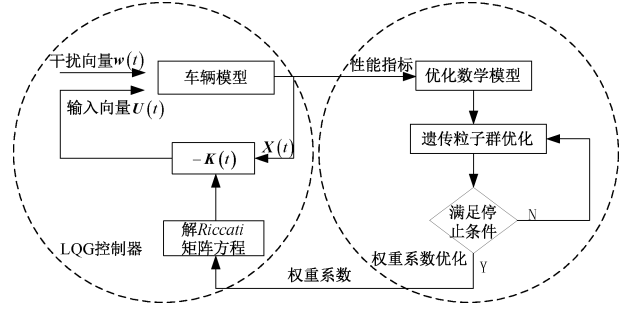


图 3 GAPSO-LQG 控制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of GAPSO-LQG control

取系统的控制输入 $U = F$, 干扰变量 $\omega = \dot{x}_r$; 状态向量和对应的输出向量分别为:

$$\mathbf{X} = [\dot{x}_s \quad x_s - x_u \quad \dot{x}_u \quad x_u - x_r]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{Y} = [\dot{x}_s \quad x_s - x_u \quad x_u - x_r]^T \quad (7)$$

式中: \dot{x}_s 为车辆簧上质量加速度; $x_s - x_u$ 为悬架动行程; $x_u - x_r$ 为轮胎动位移; \dot{x}_s 为簧载质量垂向速度; \dot{x}_u 为非簧载质量垂向速度; $\dot{x}_r(t)$ 为道路表面的速度激励。

图 2 所示模型的动力学特性可通过状态方程表述为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{F} + \mathbf{G}\mathbf{w} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{F} \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{G} 分别是状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、传递矩阵、干扰矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c_s}{m_s} & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ \frac{c_s}{m_u} & \frac{k_s}{m_u} & -\frac{c_s}{m_u} & -\frac{k_t}{m_u} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_s} & 0 & \frac{1}{m_u} & 0 \end{bmatrix}^T;$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\frac{c_s}{m_s} & -\frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w} = [\dot{x}_r];$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_s} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{G} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -1]^T;$$

在 MATLAB/Simulink 平台上构建了电子控制空气悬架系统的 LQG 系统模型,其体系结构如图 4 所示。

本文旨在设计并优化电子控制空气悬架控制系统,以显著增强其性能,首先明确系统评价标准。这些评价指标涵盖汽车操控稳定性、行车安全性和反映整车行驶舒适度

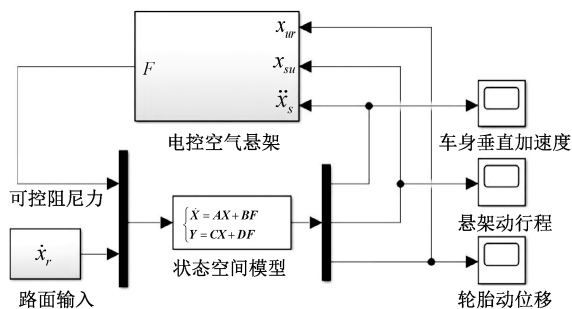


图 4 电控空气悬架 Simulink 系统模型

Fig. 4 Simulink system model of electronically controlled air suspension

的指标。即 x_{ur} 、 x_{su} 和 \ddot{x}_s 。接下来,以悬架可调阻尼力 F 为目标,设计 LQG 控制器,并定义其性能评价公式为:

$$J = \min \int_0^{\infty} (q_1 \dot{x}_s^2 + q_2 x_{su}^2 + q_3 x_{ur}^2 + q_4 F^2) dt \quad (9)$$

式中: q_1 是车身垂向加速度权重系数; q_2 是悬架动行程权重系数; q_3 是轮胎动位移权重系数; q_4 是悬架控制力权重系数; x_{su} 为悬架动行程; x_{ur} 为车辆轮胎动位移; \ddot{x}_s 是车辆簧上质量加速度。将式(9)转换为二次型形式^[19]为:

$$J = \min \int_0^{\infty} (Y^T Q_y Y + U^T R U) dt \quad (10)$$

$$Q_y = \text{diag}(q_1, q_2, q_3) \quad r = q_4$$

式中: Q_y 是状态变量的加权矩阵; r 是控制变量的加权矩阵。

将 $Y = CX + DF$ 代入 J 可得:

$$J = \min \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U + 2X^T N U) dt \quad (11)$$

$$Q = C^T Q_y C; R = r + D^T Q_y D; N = C^T Q_y D$$

式中: R 是控制变量的加权矩阵; Q 是状态变量的加权矩阵; N 是交叉项的加权矩阵。

根据选定的控制目标,选取较优的 Q 、 R 取值,通过 Riccati 方程计算得到反馈矩阵,从而确定系统的反馈输入为:

$$U = -KX \quad (12)$$

此时 K 为:

$$K = R^{-1}(N^T + B^T P) \quad (13)$$

P 矩阵可由 Riccati 方程求出:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (14)$$

2.3 遗传粒子群算法

本文融合了 GA 与 PSO 优化的高效特性,创新地提出了 GAPSO 优化的 LQG 控制算法,其核心目标是优化实值条件下的 LQG 控制器性能指标权重,通过整合选择、交叉和变异机制增强群体的多样性,以确保寻获全局最优参数解。优化算法流程如图 5 所示,详尽展示了其工作原理,具体步骤为:

1) 精细调整种群规模,迭代次数,选择概率,交叉操作概率,变异可能性,动态惯性权重与加速因子等关键参数;

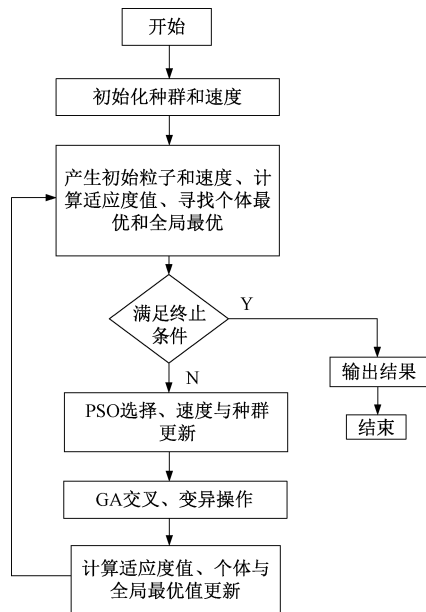


图 5 GAPSO 优化流程图

Fig. 5 GAPSO optimization flow chart

2) 初始化种群,定义个体的坐标位置与速度;

3) 评算个体的适应度函数值,依据个体历史与当前最佳位置来动态调整速度及位置,以此构建新一代种群;

4) 在种群层面,实施 GA 选择与变异处理,优选出卓越个体,并从其中选取定量的个体进行变异处理,以此构建新后代;

5) 评估当前种群的适应度函数值,更新每个个体并与全局最优值进行比较,如果达到预设的终止条件,则获取到全局最优解,若未满足条件,则回到步骤 3) 继续进行迭代。

1/4 车电子控制悬架系统的 LQG 控制器的权重系数变量及目标函数确定如下:

1) 明确 LQG 优化变量

控制器主要权重系数有 q_3 (轮胎动位移权重系数), q_2 (悬架动行程权重系数), q_1 (车身垂向加速度权重系数), q_4 (悬架控制力权重系数) 并将其表示如下:

$$X = (q_1, q_2, q_3, q_4), 0.1 < X_i < 10^6, i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

2) 确定目标函数

由于 \ddot{x}_s^2 、 $(x_s - x_u)$ 、 $(x_u - x_r)$ 的单位和数量级不一致,将性能评价指标与相应被动悬架性能指标值相除,从而得出适应度函数^[20] L 如下:

$$\text{minimize } L = \frac{BA(X)}{BA_{pas}} + \frac{SWS(X)}{SWS_{pas}} + \frac{DTD(X)}{DTD_{pas}} \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} BA < BA_{pas} \\ SWS < SWS_{pas} \\ DTD < DTD_{pas} \end{cases}$$

式中: SWS 是悬架动行程均方根值, DTD 是轮胎动位移均方根值, BA 是车身垂向加速度均方根值; SWS_{pas} 、 DTD_{pas} 、 BA_{pas} 分别代表相应被动悬架指标。

采用如下步骤实施约束处理:首先,针对每组分配的权重系数 \mathbf{X} ,运用式(15)进行计算后得到 L ,接着,严格检验此结果是否符合预先设定的限制条件 s. t.,若条件达成,赋予其适应度函数相应的数值 L ;反之,若不符合,则赋予其 $L+10$,使其远离最小值,此策略引导种群向符合约束条件的目标进化。

2.4 变指数天棚和 LQG 控制仿真分析

构建两自由度 1/4 车悬架动力学模型于 Simulink 中进行仿真,旨在对比分析变指数天棚控制,LQG 控制,传统天棚控制,被动悬架的减振性能,此模型之所有参数详细列于表 1 中。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	数值	参数	数值
m_s/kg	400	$k_t/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	250 000
m_u/kg	50	$c_s/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	1 500
$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	20 000	—	—

利用正弦波进行路面激励模拟,结果如图 6 所示,观察可见,低频段变指数天棚展现出卓越的减振性能且比传统天棚控制更优,而在高频区域,LQG 控制方法表现出优越的振动抑制效果。

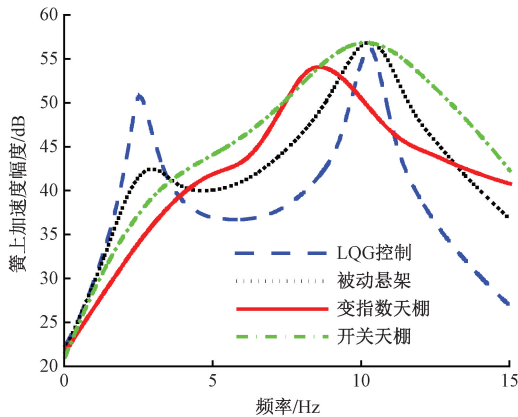


图 6 不同控制策略下簧上加速度的频域响应

Fig. 6 Frequency domain response of sprung acceleration under different control strategies

2.5 分频融合控制设计

基于上述分析,试图寻求一种分频控制方法以实现变指数天棚控制和 LQG 进行融合,使悬架系统在低频段展现出较卓越的减振性能,而在高频区域,也能表现出较优越的振动抑制效果。

图 2 所示模型之总动能构成乃簧上质量运动产生之动能与簧下质量贡献之动能两者相加:

$$K(t) = \frac{1}{2} m_s \dot{x}_s^2 + \frac{1}{2} m_u \dot{x}_u^2 \quad (17)$$

车轮内部存储的弹性势能与减振器弹簧中累积的弹性

势能之和构成模型整体弹性势能:

$$V(t) = \frac{1}{2} k_t (x_u - x_r)^2 + \frac{1}{2} k_s (x_s - x_u)^2 \quad (18)$$

在振动抑制的过程中,仅有减振器的阻尼作用伴随能量消耗。其对簧上质量的能量消耗功率为:

$$P_1 = c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) \dot{x}_s \quad (19)$$

减振器阻尼作用向弹簧下质量释放能量的功率为:

$$P_2 = c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) \dot{x}_u \quad (20)$$

天棚控制的振动抑制机理是:在能量传递中,通过减振器的阻尼作用来最大化消耗簧上质量的能量,以高效地抑制振动,实现显著减振效果。

当 $P_1 + P_2 < 0$ 时应用 LQG 控制算法可以实现更优的控制效果。而当 $P_1 + P_2 \geq 0$ 时,意味着减振器能更有效地消耗簧上质量的动能,从而能将悬架系统吸收的所有振动能量传递至弹簧下方。在这种情况下,采用变指数天棚控制效果更好。根据上述分析可知, $P_1 + P_2$ 的正负相对应 $\dot{x}_s^2 - \dot{x}_u^2$ 的正负,因此可以得出如下控制规律:

$$U = \begin{cases} c_{sky} \cdot \dot{x}_{su}, & \dot{x}_s^2 - \dot{x}_u^2 \geq 0 \\ f_{LQG}, & \dot{x}_s^2 - \dot{x}_u^2 < 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: \dot{x}_{su} 是簧上与簧下质量的相对速度, f_{LQG} 是 LQG 阻尼力。

以正弦扫频作为路面输入进行仿真,结果如图 7 所示,观察可见,在低频段下簧上质量速度增益大对应较大的速度变化幅度,此时 $|\dot{x}_s| > |\dot{x}_u|$,而在高频区域时相反,验证了频率分离方法的有效性。

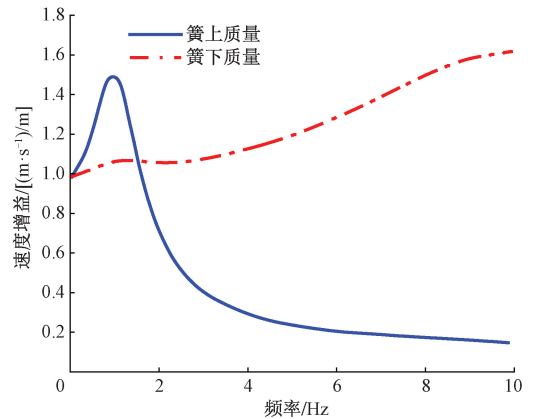


图 7 扫频输入下簧上与簧下质量速度增益对比

Fig. 7 Comparison of upsprung and unsprung mass velocity gain for sweep frequency input

3 仿真分析

在半主动悬架仿真领域,使用随机路面输入作为一种常见技巧。关于如何对路面不平度进行建模,研究者们采用了多种方法,如谐波叠加、傅里叶逆变换、小波分析、线性滤波器,以及白噪声滤波建模等^[21]。在本研究中,选择了白噪声方法来模拟随机路面输入,这种方法操作简便,并且

在低速情境下具有较高的精确性。采用滤波白噪声法^[22]，则车轮受到路面的激励可表示为：

$$\begin{cases} \dot{q}(I) = -2\pi f_0 q(I) + 2\pi n_0 \sqrt{0.5G_0 v_x} w(I) \\ \Delta s = \frac{1}{2n_{\max}} \end{cases} \quad (22)$$

式中： $q(I)$ 为路面输入激励； f_0 为下截止频率； n_0 为参考空间频率，取 0.1 m^{-1} ； $w(I)$ 为沿道路走向长度 I 的标准白噪声， $w(I) = \dot{x}_r$ ； G_0 为路面不平度系数； v_x 为汽车纵向速度； Δs 为采样间隔设定值； n_{\max} 为路面空间的上截止频率。仿真所用模型参数和优化参数详列于表 2 中。

表 2 模型与优化参数
Table 2 Model and optimization parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
簧载质量/kg	400	加速常数 c_1	1.494 45
非簧载质量/kg	50	加速常数 c_2	1.494 45
弹簧等效刚度/(N·m ⁻¹)	20 000	选择概率	0.05
减振器等效阻尼/(N·s·m ⁻¹)	1 500	交叉概率	0.4
轮胎等效刚度/(N·m ⁻¹)	250 000	变异概率	0.05
种群规模	100	迭代次数	20
惯性权重	1.6		

设定 LQR 控制器权重系数取值范围如下： $q_i \in [0.1\ 10^6]$ ， $i = 1, 2, 3, 4$ ；设定算法种群规模为 100，迭代次数为 20，优化迭代过程如图 8 所示。最终，遗传粒子群算法优化后得到的权重系数为 $q_1 = 8.3 \times 10^5$ ， $q_2 = 4.2 \times 10^5$ ， $q_3 = 2.4 \times 10^5$ ， $q_4 = 3.897 \times 10^{-1}$ 。采用 C 级路面输入，设定车速为 30 km/h，在相同结构参数和路面激励下，针对被动悬架、开关天棚控制、LQR 控制和本文所提出的变指数天棚分频混合控制分别执行 10 s 的模型仿真。经验法所确定的权重系数分别为 $q_1 = 1$ ， $q_2 = 10\ 000$ ， $q_3 = 1\ 000$ ，不考虑悬架力控制对性能指标函数的影响，即 $q_4 = 0$ 。不同控制方法下的簧上加速度频域对比曲线如图 9 所示，可以看出，变指数天棚分频混合控制在低频段的效果优于传统的开关天棚控制，在高频段效果优于 LQR 控制，实现了在全频段的有效振动抑制，充分提高了乘坐舒适性，且其算法结构简易高效，应用成本更低。为了更好的验证其

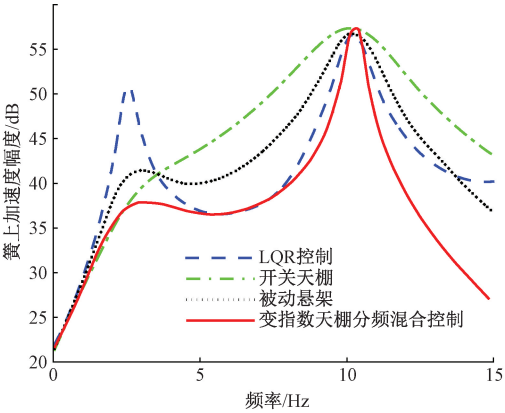


图 9 不同控制下簧上加速度的频域响应
Fig. 9 Frequency domain response of sprung acceleration under different controls

控制效果，下面将开展相关实验验证并与其他混合类控制算法进行对比。

4 实验验证

为了更好地验证变指数天棚分频混合控制策略的可行性及其控制效果，依据汽车控制器“V”字型开发流程^[23]，本文搭建了基于 U2 快速控制原型和 dSPACE/Simulator 实时仿真器的硬件在环实验平台（HIL）如图 10 所示。综合利用车载电子控制单元、CarSim-Simulink 联合仿真模型、网络通信模块、CAN 总线分析仪、U2 控制器、CAN 卡、上下位机、HIL 试验台等进行硬件在环实验^[24]。CAN 总线分析仪将构建于上位机的 CarSim-Simulink 联合仿真模型与车载电子控制单元进行连接，将电控空气悬架系统阻尼控制所需要的车辆状态信息通过 CAN 总线进行通讯，实现阻尼控制，为符合车辆实际运行

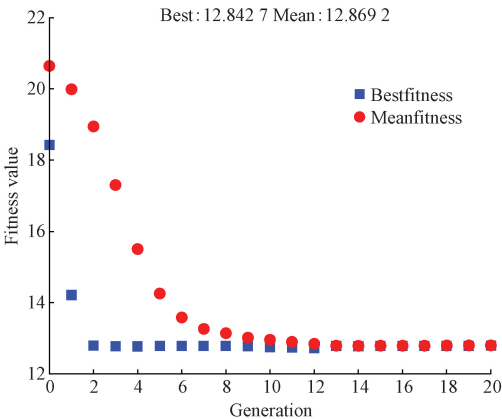


图 8 遗传粒子群算法迭代优化图
Fig. 8 Iterative optimization diagram of genetic particle swarm optimization algorithm

状态,本文采用随机路面实验工况进行验证,并与其他混合控制算法进行对比。

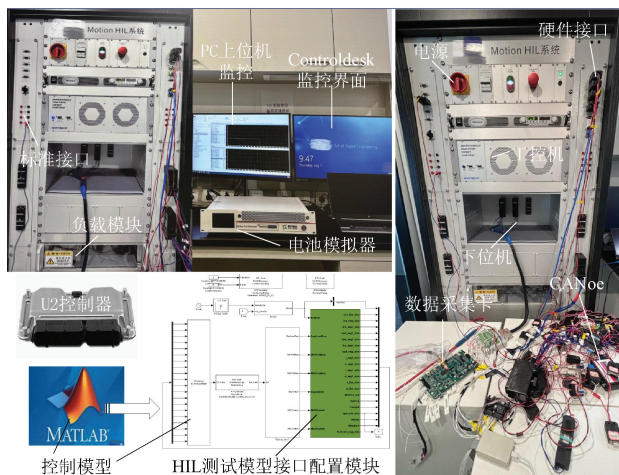


图 10 硬件在环实验验证平台

Fig. 10 Hardware-in-the-loop experiment verification platform

使用与上述仿真相同的模型与优化参数,实验采用 C 级路面输入,设定车速为 30 km/h,在相同结构参数和路面激励下,选取被动悬架、SH-ADD 混合控制和本文所提出的变指数天棚分频混合控制进行实验对比验证。选取系统稳定后 10 s 的实验结果进行数据对比分析,结果如图 11~14 所示。在不同控制策略下 $\dot{x}_s, x_s - x_u, x_u - x_r$ 的均方根值的对比情况详细记录于表 3。具体而言,变指数天棚分频混合控制相较于 SH-ADD 及被动悬架,各性能指标的均方根值均有所改善,如表 4 所示。

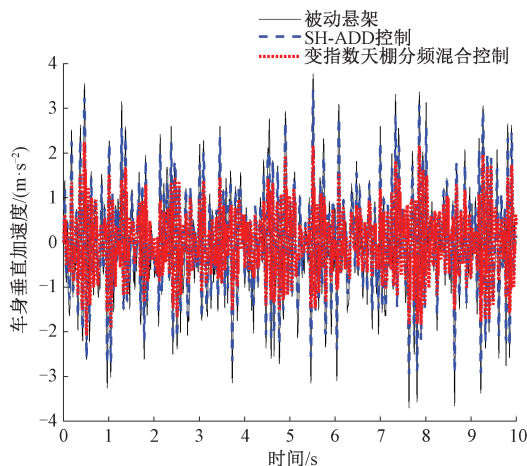


图 11 簧上质量加速度时域响应比较图

Fig. 11 Comparison of time domain response of sprung mass acceleration

从图 11、12 可知,图 11 为簧载质量加速度时域对比曲线,从中可以看出变指数天棚分频混合控制使得车身垂向加速度波动减小很多,相对于被动悬架和 SH-ADD 混合控制,更好的提高了舒适性。图 12 显示了车身加速度功率

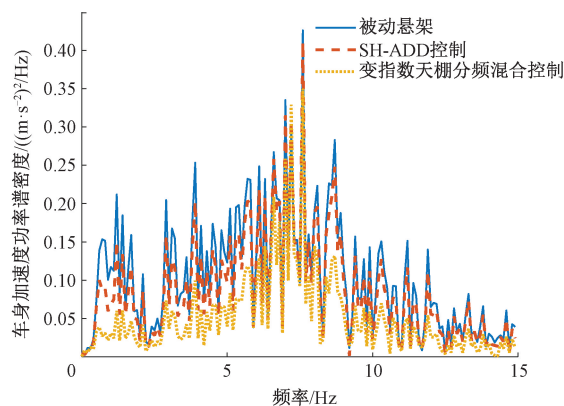


图 12 簧上质量加速度频域响应比较图

Fig. 12 Comparison diagram of frequency domain response of sprung mass acceleration

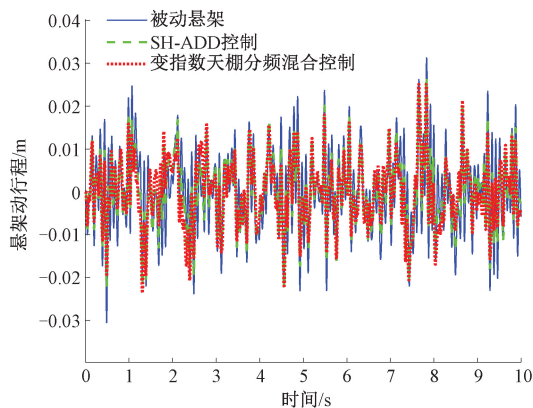


图 13 悬架动行程时域响应比较图

Fig. 13 Comparison diagram of time-domain response of suspension dynamic travel

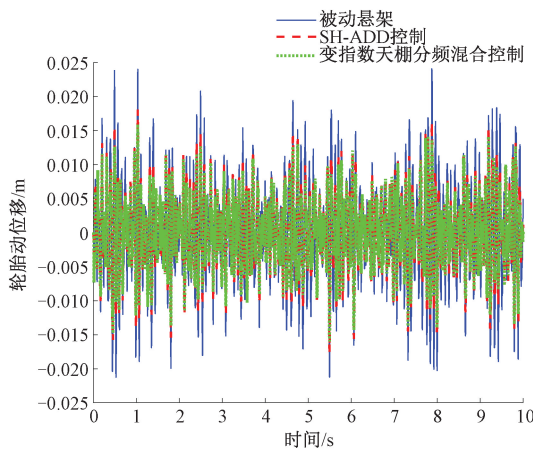


图 14 轮胎动位移时域响应比较图

Fig. 14 Comparison diagram of time-domain response of tire dynamic displacement

谱密度曲线,即频域分析,从图中可知,在频率 1~15 Hz 范围内,不论处于高频段还是低频段,变指数天棚分频混

表 3 不同控制策略下的电控空气悬架性能指标均方根值
Table 3 RMS values of performance indicators of electronically controlled air suspension under different control strategies

控制策略	车身垂直	悬架动	轮胎动
	加速度	行程	位移
被动悬架	0.606 4	0.011 9	0.011 6
SH-ADD 控制	0.550 0	0.011 8	0.010 8
分频混合控制	0.514 7	0.011 4	0.010 6

表 4 变指数天棚分频混合控制相较于被动悬架、SH-ADD 控制各性能指标均方根值的改善率

Table 4 Improvement rates of RMS of performance indicators of variable index ceiling frequency division hybrid control compared with passive suspension and SH-ADD control

对比控制类型	车身垂直	悬架动	轮胎动
	加速度	行程	位移
被动悬架	15.53	4.21	8.95
SH-ADD	6.42	3.39	1.85

合控制都表现出较好的减振效果,明显优于被动悬架和 SH-ADD 控制。从图 13、14 展示的悬架动行程与轮胎动位移的时域对比显示,因悬架系统的指标间存在相互制约,因此在簧上质量加速度及悬架动挠度层面,控制系统增加了对它的优化倾向,本文所提出的分频混合控制降低了车身加速度的幅值,提高了舒适性,对轮胎动载荷与悬架动挠度的整体优化虽有限,但对两个指标仍具有改善,有益于增强提高汽车操控稳定性与乘坐舒适度。表 3 显示了 C 级路面,车速为 30 km/h 时,不同控制方法下悬架的车身加速度、悬架动行程与轮胎动位移的均方根值。

从表 4 数据可得,针对 C 级路面工况,与被动悬架相比,采用本文所提出的控制方法的空气悬架较为显著地降低了车身垂向加速度、悬架动行程及轮胎动位移的均方根值,分别降低了 15.53%、4.21%、8.95%。相较于 SH-ADD 混合控制策略,在相同条件下,变指数天棚分频混合控制在减少这 3 项评价指标的均方根值上也表现出一定成效,分别降低了 6.42%、3.39%、1.85%。此实验结果验证了本文所提出的分频混合控制不仅有效降低了簧上质量加速度,且在降低悬架动挠度和轮胎动载荷方面也展现出一定的成效,有效抑制了轮胎跳动,从而实现了汽车乘坐平顺性和操纵稳定性的双重提升。

5 结 论

本文针对改善乘车舒适性的目标,考虑到单一控制算法的局限性,难以满足多工况下的控制需求以及部分结合现代控制理论或采用先进优化方式的混合控制算法存在

对软硬件要求高,应用成本高等挑战,提出了一种算法结构简易高效,应用成本低,在全频段均具有较好控制效果的电控空气悬架阻尼分频混合控制方法。由于人体对低频的垂直振动更为敏感,该算法采用高低频分频的方式使用变指数天棚控制和 LQG 控制进行联合控制,并结合遗传粒子群算法优化 LQG 控制中的权重系数,使其取得全局最优解。最后在 Simulink 中搭建了 1/4 车辆电控空气悬架模型进行仿真验证并搭建了基于 U2 快速控制原型和 dSPACE/Simulator 实时仿真器的硬件在环实验平台(HIL),综合利用车载电子控制单元、CarSim-Simulink 联合仿真模型、网络通信模块、CAN 总线分析仪、U2 控制器等进行硬件在环实验验证其控制效果。

仿真和实验结果表明,本文所提出的分频混合控制方法比 LQR 控制效果更好且相较于被动悬架,车身垂向加速度降低了 15.53%,相较于 SH-ADD 混合控制,车身加速度降低了 6.42%,在高频区域和低频段都具有较好的减振效果,充分改善了乘坐舒适性,且算法简易,高效可行,在降低悬架动挠度和轮胎动载荷方面也展现出一定的成效,有效抑制了轮胎跳动,能够同时改善乘坐舒适性和操纵稳定性。

本文仅对 1/4 车悬架模型进行了验证,后续将持续开展整车模型研究及实车验证。

参考文献

[1] 刘锦超,李军伟,陈斌,等.乘用车电控空气悬架高度控制策略[J]. 液压与气动,2024,48(2):108-115.
LIU J CH, LI J W, CHEN B, et al. Height control strategy of electronically controlled air suspension for passenger car[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024,48(2): 108-115.

[2] 张宇翔,陈仁文,任龙,等.复合式电磁馈能悬架阻尼器的设计与测试[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2): 132-139.
ZHANG Y X, CHEN R W, REN L, et al. Design and test of compound electromagnetic energy-fed suspension damper[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(2):132-139.

[3] 郑爽,范例.基于 SOA-LQR 控制的电控空气悬架系统[J]. 湖北汽车工业学院学报,2023,37(2):7-12.
ZHENG SH, FAN L. Electronic controlled air suspension system based on SOA-LQR control[J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology,2023,37(2):7-12.

[4] 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 L X, LI N F, LIANG G Q, et al. Research on smooth ceiling control strategy of damping

- continuously adjustable semi-active suspension[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 169-173,184.
- [5] 寇发荣,陈龙,张传伟,等.汽车磁流变半主动悬架混合天棚控制仿真[J].机械设计与制造,2017(7): 232-236.
- KOU F R, CHEN L, ZHANG CH W, et al. Simulation of hybrid ceiling control for automotive magnetorheological semi-active suspension[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(7): 232-236.
- [6] 林长波,王越,许恩永,等.半主动悬架改进 ADD 控制策略研究[J].噪声与振动控制,2023,43(1):197-202.
- LIN CH B, WANG Y, XU EN Y, et al. Research on improved ADD control strategy for semi-active suspension[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(1):197-202.
- [7] 郭全民,雷蓓蓓.半主动悬架 PID 控制的研究和优化[J].国外电子测量技术,2015,34(4):60-63.
- GUO Q M, LEI B B. Research and optimization of PID control for semi-active suspension[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(4): 60-63.
- [8] 李刚,顾瑞恒,胡国良,等.车辆磁流变半主动空气悬架模糊滑模控制研究[J].现代制造工程,2021(2): 49-57.
- LI G, GU R H, HU G L, et al. Research on fuzzy sliding mode control of vehicle magnetorheological semi-active air suspension[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(2):49-57.
- [9] LI G, ZHONG L, SUN W, et al. A variable horizon model predictive control for magnetorheological semi-active suspension with air springs[J]. Sensors, 2024, 24(21): 6926.
- [10] 潘公宇,范菲阳,冯鑫.基于主动悬架的整车车身姿态控制策略研究[J].电子测量技术,2024,47(2):79-88.
- PAN G Y, FAN F Y, FENG X. Research on vehicle body attitude control strategy based on active suspension[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2):79-88.
- [11] 王越,刘夫云,邓聚才,等.半主动悬架 SH-LQR 阻尼控制策略仿真研究[J].噪声与振动控制,2022,42(3): 68-72,79.
- WANG Y, LIU F Y, DENG J C, et al. Simulation of SH-LQR damping control strategy for semi-active suspension[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(3): 68-72,79.
- [12] 郭孔辉,王杨.一种改进的加速度阻尼半主动控制策略研究[J].汽车工程,2019,41(5):481-486.
- GUO K H, WANG Y. Research on an improved acceleration damped semi-active control strategy[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(5): 481-486.
- [13] 李志清,李美,付丽荣,等.遗传算法优化的空气悬架模糊 PID 控制[J].机械设计与制造,2023(4):22-25,33.
- LI ZH Q, LI M, FU L R, et al. Fuzzy PID control of air suspension optimized by genetic algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(4): 22-25,33.
- [14] 寇发荣,杨旭东,李盛霖.复合式空气悬架多模式切换终端滑模控制[J].振动与冲击,2024,43(11):83-93.
- KOU F R, YANG X D, LI SH L. Sliding mode control of multi-mode switching terminal for compound air suspension[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(11):83-93.
- [15] ZHU Y, BIAN X, SU L, et al. Ride comfort improvement with preview control semi-active suspension system based on supervised deep learning[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2021, 5(1): 31-44.
- [16] 王子贺,李存贺,焦提操,等.基于机器学习的同步磁阻电机转子结构优化研究[J].电子测量与仪器学报, 2024, 38(9):116-126.
- WANG Z H, LI C H, JIAO T C, et al. Rotor structure optimization of synchronous reluctance motor based on machine learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 116-126.
- [17] LIU J, LIU J, LI Y, et al. Study on multi-mode switching control strategy of active suspension based on road estimation[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3310.
- [18] 李刚,谢森锦,胡国良,等.车辆磁流变半主动悬架 GSA-LQG 控制研究[J].现代制造工程,2022(11): 48-54.
- LI G, XIE M J, HU G L, et al. Research on GSA-LQG control of vehicle magnetorheological semi-active suspension[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(11):48-54.
- [19] 杨广旭.车辆半主动悬架最优控制方法研究[D].长春:吉林大学,2022.
- YANG G X. Research on optimal control method of vehicle semi-active suspension[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [20] 陈双,宗长富.车辆主动悬架的遗传粒子群 LQG 控制方法[J].汽车工程,2015,37(2):189-193.
- CHEN SH, ZONG CH F. Genetic particle swarm LQG control method for vehicle active suspension[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(2): 189-193.
- [21] 赵斌,董浩,黄波,等.白噪声路面不平度时域模型的建

立与仿真[J]. 汽车实用技术,2019(3):89-90,115.

ZHAO B, DONG H, HUANG B, et al. Establishment and simulation of white noise road roughness timedomain model [J]. Automotive Practical Technology,2019(3): 89-90,115.

[22] 陈士安,全嘉成,蒋旭东,等. 基于调制白噪声与查表法的非平稳路面不平度建模方法[J]. 交通运输工程学报,2020,20(6):171-179.

CHEN SH AN, TONG J CH, JIANG X D, et al. Non-stationary road roughness modeling method based onmodulated white noise and table lookup[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 171-179.

[23] 桂永建,马英照,严天一. 新型连续阻尼可调悬架系统超视距预瞄控制策略研究[J]. 机械科学与技术,2023, 42(8): 1324-1331.

GUI Y J, MA Y ZH, YAN T Y. Research on over-the-horizon pre-sight control strategy of a novel continuous damping adjustable suspension system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2023,42(8):1324-1331.

[24] 杨东坡. 混合动力商用车多目标协调控制方法研究[D]. 长春:吉林大学,2022.

YANG D P. Research on multi-objective coordinated control method of hybrid commercial vehicle [D]. Changchun;Jilin University,2022.

作者简介

潘公宇,博士,教授,主要研究方向为车辆系统动力学、车辆 NVH 性能及振动控制研究等。

杜曾龙(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为车辆振动控制技术研究。

E-mail:duzenglong2022@163.com