

文章编号 1672-6634 (2023)01-0024-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2022050019

基于低通滤波 PID 控制的主动座椅悬架系统研究

马 硕¹, 江 华², 郭兴利³, 李永明¹

(1. 辽宁工业大学 电气工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 浙江春风动力股份有限公司, 浙江 杭州 311100;
3. 辽宁航天凌河汽车有限公司, 辽宁 朝阳 122500)

摘 要 研究了一种基于低通滤波的主动座椅悬架系统 PID 控制方法。针对 1/2 掀背车的主动座椅悬架系统模型, 将车身垂直加速度、车身俯仰加速度、前后悬架动行程和前后轮胎动载荷作为评价主动座椅悬架系统性能的指标, 设计基于低通滤波的比例-积分-微分(PID)控制器, 通过编程软件 MATLAB/Simulink 以及车辆仿真软件 Carsim 进行联合仿真。最后将具有低通滤波 PID 控制器的主动座椅悬架系统在 80 km/h 的速度下与被动座椅悬架系统进行仿真对比。仿真结果表明, 所设计的基于低通滤波的 PID 控制器不仅可以有效降低车身垂直加速度以及车身俯仰加速度、使悬架动行程在标准范围内进一步改善, 而且可以加强轮胎与地面的接触, 对提升车辆乘坐舒适性以及驾驶安全性具有显著的效果。

关键词 主动座椅悬架系统; 低通滤波; PID 控制器; 联合仿真; Carsim; 仿真对比

中图分类号 TP273

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research on Active Seat Suspension System Based on Low-Pass Filtering PID Control

MA Shuo¹, JIANG Hua², GUO Xingli³, LI Yongming¹

(1. School of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2. Zhejiang CFMOTO Power Co., Ltd., Hangzhou 311100, China; 3. Liaoning Aerospace Linghe Automobile Co., Ltd., Chaoyang 122500, China)

Abstract This paper researches a proportional-integral-derivative(PID) control method for active seat suspension systems, which based on low-pass filtering. For the semi hatchback active seat suspension system models, the body vertical acceleration, body pitch acceleration, front and rear suspension dynamic travel, front and rear tire dynamic load are taken as the indexes to evaluate the performances of the active seat suspension systems. The PID controller based on low-pass filter is designed. And co-simulation is carried out through programming software MATLAB/Simulink and vehicle simulation software Carsim. Finally, the active seat suspension system with low-pass filtering PID controller and the passive seat suspension system are simulated and compared at the speed of 80 km/h. The simulation results show that the designed PID controller, which is based on low-pass filter can not only effectively reduce the vertical acceleration

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A2043)资助

通讯作者: 李永明, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 国家自然科学基金优秀青年基金获得者, 研究方向: 智能控制理论及应用, E-mail: l_y_m_2004@163.com。

and pitch acceleration of the body, further improve the suspension movement within the standard range, but also can strengthen the contact between the tires and the ground, which has a significant effect on improving the ride comfort and driving safety of the vehicle.

Key words active seat suspension system; low-pass filtering; PID controller; co-simulation; Carsim; simulation comparison

1 引言

近年来,随着汽车产业的高速健康发展,提高车辆整体性能成为当前汽车研究领域的热门问题之一。由于汽车悬架系统在改善车辆驾驶安全性和乘坐舒适性方面起到至关重要的作用。因此在过去的几十年里,研究人员对悬架系统的研究从未停歇^[1,2]。

汽车悬架系统按照控制方式的不同分为被动悬架系统、半主动悬架系统以及主动悬架系统三大类^[3]。其中,被动悬架系统的减振器阻尼和弹簧刚度不可调节且振动性能较差,难以适应复杂的随机路面^[4,5]。半主动悬架系统虽然增加了自动调节装置,可以自动调节悬架阻尼系数和弹性参数^[6,7],但减振器调节困难并且控制复杂。相比于被动悬架系统和半主动悬架系统,主动悬架系统可以通过自身能量对复杂路面振动做出自主响应,进而达到减缓车辆自身抖动,提高车辆安全性和稳定性的目的^[8,9]。因此,与被动悬架系统和半主动悬架系统相比,主动悬架系统控制效果最优。

自 20 世纪 80 年代起,微处理器和电子学的成熟促进了主动悬架系统的实际应用,智能控制策略在提升主动悬架系统性能方面起到决定性作用^[10,11]。智能控制策略主要包括模糊逻辑系统控制^[12,13]、人工神经网络控制^[14,15]和遗传算法控制^[16,17]等。文献[18]针对非线性四分之一汽车主动悬架系统模型,应用自适应模糊反步递推控制理论,在考虑随机扰动和全状态约束情况下,提出了一种新的自适应模糊控制策略。通过所设计的实际控制器消除随机路面引起的扰动并稳定车辆的姿态,进而提高车辆驾驶安全性和乘坐舒适性。文献[19]采用前馈-递归神经网络方法对重型卡车主动悬架系统的正动力学和逆动力学进行建模,设计一种基于人工神经网络的控制器,利用悬架系统的动态测试获得神经网络的训练数据和验证数据,从而克服了车辆行驶过程中驾驶安全性和乘坐舒适性之间的矛盾问题。文献[20]则针对四分之一主动悬架系统,提出了一种基于遗传算法的最优滑模控制策略,利用遗传算法优化滑模控制切换函数的权重系数和控制律的参数并设计实际控制器,从而提高了传统滑模控制下的主动悬架系统动态性能。

为了进一步反应汽车悬架系统的实际应用情况,国内外学者将座椅和主动悬架系统连接在一起构造主动座椅悬架系统展开研究,与普通的主动悬架系统相比,主动座椅悬架系统具有更好的通用性和整体性,可以更加实际的反应汽车车身垂直方向的性能,并能更加直接的反映乘客的舒适度。文献[21]针对四分之一车辆主动座椅悬架系统,提出了一种新的输出反馈 H_∞ 最优控制策略,通过在汽车主动悬架系统建模中考虑人体和座椅,采用输出反馈控制策略估计一些未知状态变量,并在考虑轮胎和悬架系统偏转以及作动器饱和等约束条件下设计所需的控制器,使座椅垂直加速度最小化,进而提高了车辆乘坐舒适性。文献[22]则针对一类具有未知函数的四分之一主动座椅悬架系统,提出了一种基于事件触发的全状态时变约束控制方法,采用径向基函数神经网络来逼近未知函数项,并利用障碍 Lyapunov 函数来确保系统状态满足相应的约束条件,通过设计具有相对阈值的事件触发控制器,以减轻主动座椅悬架系统中执行器和控制器的通信负担。由此可见,现有的控制方法在主动座椅悬架系统控制领域具有广泛的应用价值。

而 PID 作为一种传统的控制策略,由于稳定性高、参数调节便捷以及适应能力强等优势,已经被应用在汽车主动悬架控制设计中。文献[23]针对八自由度 3D 汽车动力学模型在 MATLAB/Simulink 中对车辆主动悬架系统设计 PID 控制器,在不同路面和车速激励下通过将主动悬架系统的车身加速度与被动悬架系统的车身加速度均方根值进行比较,从而得出基于 PID 控制的汽车主动悬架系统在抑制车身振动方面具有显著的效果。低通滤波器作为一种有效的过滤方式,具有抑制高频信号,通过低频信号的优点,在控制器输出力到执行器之间的环节加入低通滤波器可以有效抑制高频干扰^[24]。本文针对 1/2 掀背车的主动座椅悬架

系统模型,在 MATLAB/Simulink 编程软件中设计基于低通滤波的 PID 控制器模块并在线进行 PID 控制参数的调整,为了充分反应 1/2 主动座椅悬架系统实际振动情况,通过 MATLAB/Simulink 软件和 Carsim 软件进行联合仿真,并与被动悬架系统在其他车辆整体条件相同的情况下进行仿真比较。通过对两类悬架系统所对应的车身垂直加速度、车身俯仰加速度、悬架动行程以及轮胎动载荷的仿真曲线进行比较,从而分析所设计的控制器的作用。联合仿真结果表明,所设计的基于低通滤波的 PID 控制器可以有效改善汽车的整体性能,进而提高车辆的稳定性与安全性。

2 随机路面模型和 1/2 主动座椅悬架系统模型的建立

2.1 随机路面输入模型的建立

车辆在行驶过程中产生的振动主要由随机路面激励产生,为了充分反映实车的运动性能,选取随机粗糙路面作为输入^[25],随机粗糙路面输入 $R(t)$ 满足

$$\dot{R}(t) = 2\pi(n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u \omega(t) - f_0 R(t)), \quad (1)$$

式中 u 为车辆行驶速度, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 是空间参考频率, $\omega(t)$ 为高斯白噪声, $f_0 = 0.01$ 是滤波器下限截止频率, $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数,为了接近实际的运行工况,本文根据国标 GB/T7031-1986《车辆振动输入-路面不平度表示方法》选择 C 级随机路面作为输入,路面不平度系数为 $G_q(n_0) = 256 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ^[26]。当车速为 80 km/h 时,掀背车在 C 级随机路面的输入响应曲线如图 1 所示。

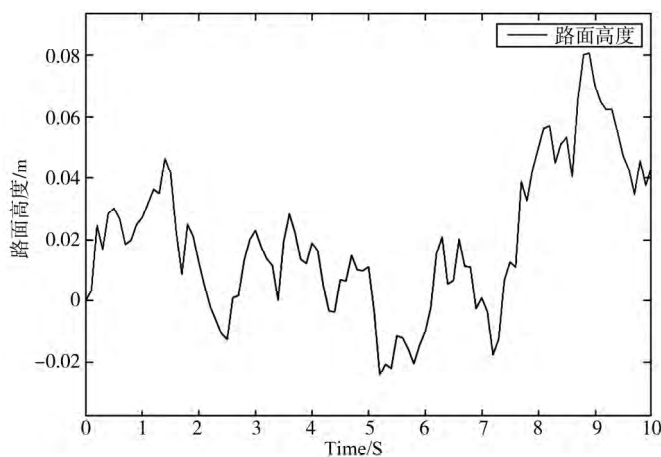


图 1 80 km/h 时随机路面输入响应曲线

2.2 1/2 主动座椅悬架系统模型的建立

为了对 1/2 掀背车的主动座椅悬架系统进行研究分析,搭建一个可以精确反应 1/2 主动座椅悬架系统振动状态的五自由度悬架系统模型,其中包括 1/2 车辆座椅垂直方向运动前后两个轮胎的上下跳动,以及车身垂直方向和俯仰方向的运动。1/2 主动座椅悬架系统模型如图 2 所示。

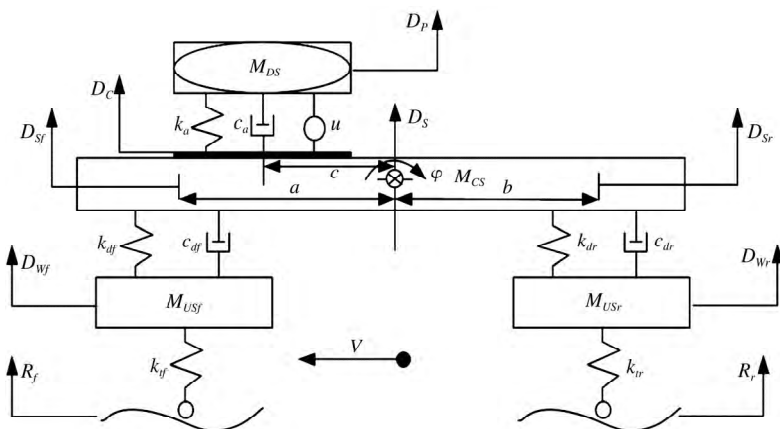


图 2 1/2 主动座椅悬架系统模型

根据牛顿第二定律,1/2 主动座椅悬架系统模型的动力学微分方程可以表示为

$$\begin{cases} M_{DS} \ddot{D}_P + F_{Ka} + F_{Ca} + u = 0, \\ M_{CS} \ddot{D}_S - F_{Ka} - F_{Ca} + F_{Kdf} + F_{Kdr} + F_{Cdf} + F_{Cdr} - u = 0, \\ I_{\varphi} \ddot{\varphi} - c(F_{Ka} + F_{Ca} + u) + a(F_{Kdf} + F_{Cdf}) - b(F_{Kdr} + F_{Cdr}) = 0, \\ M_{USf} \ddot{D}_{wf} - F_{Kdf} - F_{Cdf} + F_{Ktf} = 0, \\ M_{USr} \ddot{D}_{wr} - F_{Kdr} - F_{Cdr} + F_{Ktr} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中 M_{DS} 、 M_{CS} 、 M_{USf} 和 M_{USr} 分别表示车辆座椅、车身、前向轮胎和后向轮胎的质量, D_P 、 D_C 、 D_{Sf} 、 D_{Sr} 、 D_{Wf} 、 D_{Wr} 、 R_f 以及 R_r 分别表示座椅质心、座椅底部车身、前悬架质心、后悬架质心、前向轮胎、后向轮胎的垂直位移以及前轮和后轮的路面不平度输入, I 是俯仰转动惯量, φ 表示车辆质心处俯仰转角, a 、 b 和 c 分别表示车辆质心到前轴、车辆质心到后轴以及车辆质心到座椅的水平距离, F_{Ka} 、 F_{Kdf} 、 F_{Kdr} 、 F_{Ktf} 和 F_{Ktr} 分别表示车辆座椅、前悬架质心、后悬架质心、前向轮胎以及后向轮胎产生的弹簧力, F_{Ca} 、 F_{Cdf} 和 F_{Cdr} 分别表示车辆座椅、前悬架质心以及后悬架质心产生的阻尼力, u 表示作动器的输入力。其中 $D_{Sf} = D_S + a\varphi$, $D_{Sr} = D_S - b\varphi$, $D_C = D_S + c\varphi$, $F_{Ka} = k_a(D_P - D_C)$, $F_{Kdf} = k_{df}(D_{Sf} - D_{Wf})$, $F_{Kdr} = k_{dr}(D_{Sr} - D_{Wr})$, $F_{Ktf} = k_{tf}(D_{Wf} - R_f)$, $F_{Ktr} = k_{tr}(D_{Wr} - R_r)$ 。

3 基于低通滤波的 PID 控制器设计

PID 控制器作为传统的工业控制策略,通过将检测信号和目标值进行比较得到偏差信号,并对偏差值计算处理作为新的信号输入,使系统数据能够较好的跟踪预设值。PID 控制系统主要由 PID 控制器和被控对象两部分构成。通过经验法整定 PID 控制器的参数值能够改善系统的稳定性并提高系统的准确性^[27]。低通滤波器则可以使高于截止频率的信号不能通过,而仅仅通过低频信号,在控制器输出到力执行器之间的环节加入低通滤波器可以有效抑制高频信号干扰。基于低通滤波的 PID 控制系统的结构框图如图 3 所示。

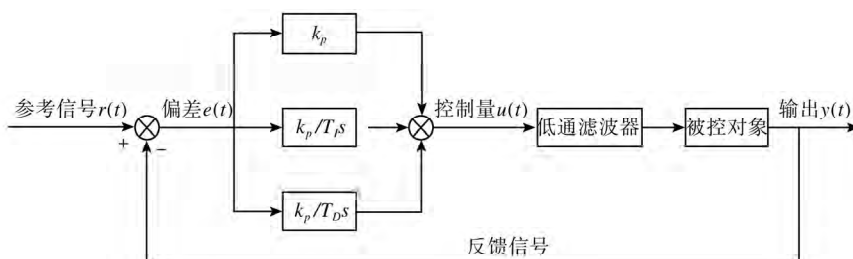


图3 基于低通滤波的PID控制系统结构框图

PID 控制器输入偏差 $e(t)$ 与输出 $y(t)$ 的关系为^[28]

$$y(t) = K_p(e(t) + 1/T_I \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}), \quad (3)$$

式中 K_p 是 PID 控制器的比例系数, T_I 和 T_D 分别为 PID 控制器的积分时间常数和微分时间常数。控制器的输入偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$, $r(t)$ 为参考误差,一般设置为 0。本文在基于低通滤波 PID 控制器的设计过程中,以座椅垂直速度与理想速度的偏差作为输入变量,输出变量为作动器的控制力。根据 1/2 主动座椅悬架系统的实时输入,输出和偏差在线设计低通滤波 PID 的 K_P 、 K_I 和 K_D ,并及时修正 3 个控制参数,进而实现掀背车主动座椅悬架系统的动态调节,提高车辆的整体性能。

4 MATLAB/Simulink 与 Carsim 联合仿真

在研究 1/2 主动座椅悬架系统控制策略时,应用 MATLAB/Simulink 编程软件和车辆动力学 Carsim 仿真软件联合搭建仿真模型更能符合实际车辆振动情况^[29,30]。其中,在 MATLAB/Simulink 中,将生成的 Simulink 模块和 Carsim 模块进行连接,并在 Carsim 软件中与被动座椅悬架系统进行仿真比较。在 Simulink 中搭建的联合仿真模型图如图 4 所示。

在 Carsim 软件进行 C 型掀背车的模型构建,主要包括:车体轴心到

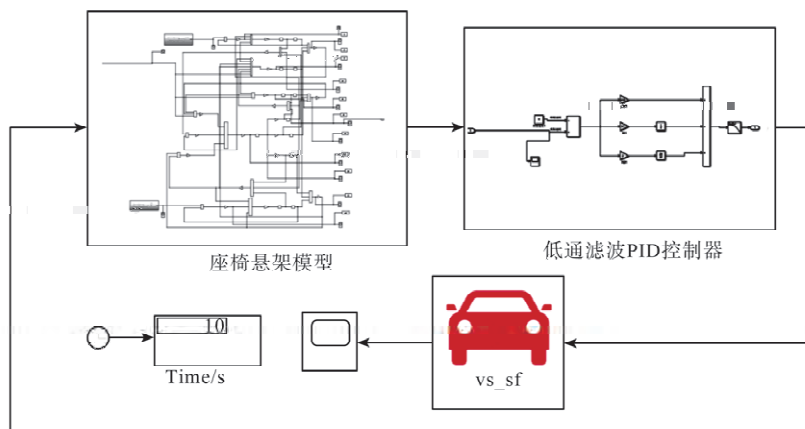


图4 联合仿真模型图

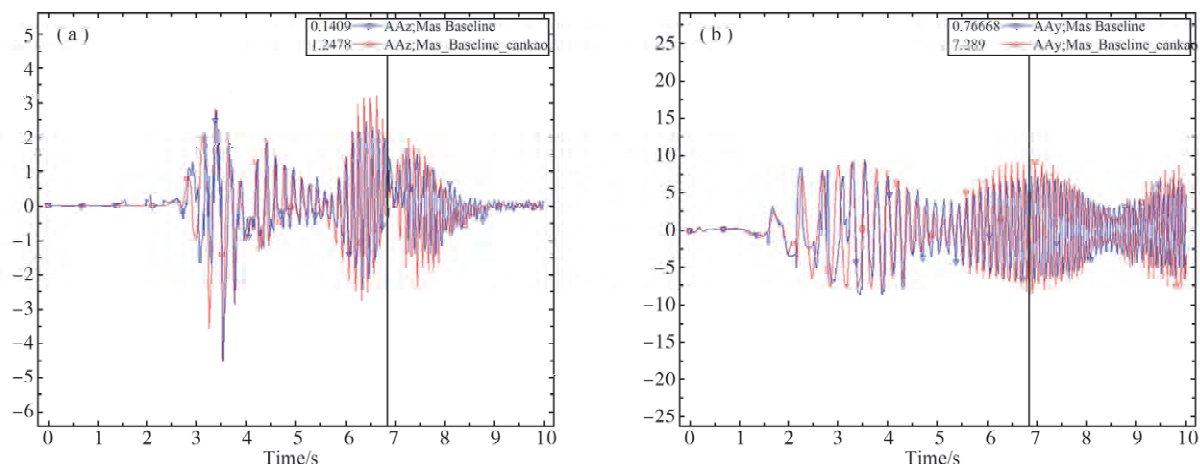
前轮和后轮的水平距离、轴心的垂直高度、前轮和后轮的轴间距等参数信息。同时,Carsim 软件在对车辆建模时选择由弹簧和阻尼器构成的独立悬架。根据 C 型掀背车实车要求,掀背车模块的刚体名称,前后独立悬架运动学特性(K 特性),前后独立悬架弹性运动学(C 特性)的参数配置如表 1 所示。

表 1 C 型掀背车模块的参数设置

参数名称	参数数值	参数名称	参数数值
M_{DS}/kg	240	$K_{tf}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	405 000
M_{CS}/kg	1 030	$K_{tr}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	405 000
M_{USf}/kg	135	$K_a/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	2 550
M_{USr}/kg	135	a/mm	1 015
$I/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1 536.7	b/mm	1 895
$K_{df}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	30 000	c/mm	200
$K_{dr}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	30 000		

5 联合仿真结果与分析

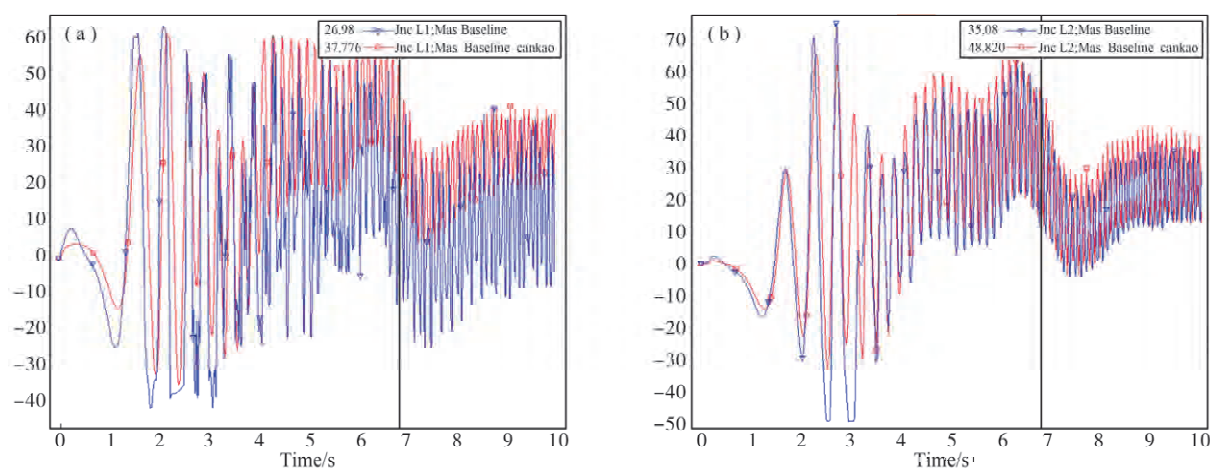
在其他条件相同的情况下,选取图 1 所示的随机路面作为输入,针对基于低通滤波 PID 控制器下的主动座椅悬架系统,在 80 km/h 的速度下与被动座椅悬架系统进行仿真对比。在 Carsim 软件中利用车身垂直加速度、车身俯仰加速度、前后悬架动行程和前后轮胎动载荷作为评价主动座椅悬架系统性能的指标,从而分析所设计的基于低通滤波的 PID 控制器对提升主动座椅悬架系统性能的影响。



注:(a) 车身垂直加速度仿真结果对比图;(b) 车身俯仰角加速度仿真结果对比图。

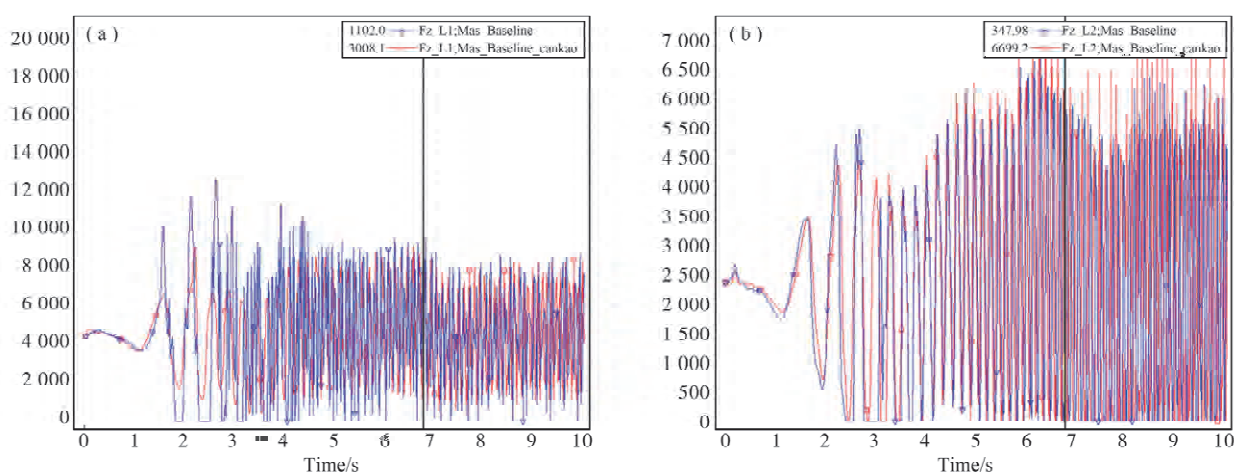
图 5 车身垂直加速度和俯仰角加速度仿真结果对比图

车速在 80 km/h 时,基于低通滤波 PID 控制器下的主动座椅悬架系统和被动座椅悬架系统的性能指标对比如图 5-7 所示。在系统仿真对比图中,“蓝线”为基于低通滤波 PID 控制器下的主动座椅悬架系统性能指标仿真曲线,“红线”为被动座椅悬架系统的性能指标仿真曲线。其中,图 5(a)和图 5(b)分别是车速为 80 km/h 时 C 型掀背车的车身垂直加速度和车身俯仰加速度对比图。由于 C 型掀背车主动座椅悬架系统机械刚度限制不能过大所以采用前后悬架动行程作为评价指标,车速在 80 km/h 时前后悬架动行程的时域响应对比如图 6 所示,其中如图 6(a)为前悬架动行程时域响应对比图,如图 6(b)为后悬架动行程时域响应对比图。通过轮胎动载荷可以进一步判断轮胎与地面的接触效果,轮胎动载荷时域响应对比如图 7 所示,其中,图 7(a)为前轮胎动载荷时域响应对比图,如图 7(b)为后轮胎动载荷时域响应对比图。



注:(a) 前悬架动行程时域响应对比图;(b) 后悬架动行程时域响应对比图。

图 6 前后悬架动行程时域响应对比图



注:(a) 前轮胎动载荷时域响应对比图;(b) 后轮胎动载荷时域响应对比图。

图 7 前后轮胎动载荷时域响应对比图

由图 5(a)和图 5(b)中 C 型掀背车的车身垂直加速度和车身俯仰角加速度仿真对比可以看出,与被动座椅悬架系统相比,基于低通滤波 PID 控制器下的主动座椅悬架系统在速度为 80 km/h 时的仿真曲线在总体上具有明显降低,可以大幅度降低车身垂直加速度和车身俯仰角加速度,从而显著提高车辆的乘坐舒适性和驾驶安全性。由图 6(a)和图 6(b)可知在车辆悬架系统机械刚度的要求下,基于低通滤波 PID 控制器下的主动座椅悬架系统的前后悬架动行程仿真曲线在标准范围要求内相比于被动座椅悬架系统有大幅度的降低,从而可以有效降低车辆的底盘损毁,提高车辆的安全性。从图 7(a)和图 7(b)中可以看出,在 C 型掀背车行驶过程中,基于低通滤波 PID 控制器下的主动座椅悬架系统较被动座椅悬架系统在一定程度上降低了前后轮胎的动载荷,进而加强轮胎与地面的接触效果。由此可见,本文设计的基于低通滤波 PID 控制器在车速为 80 km/h 时可以很好地提高车身垂直加速度、车身俯仰加速度、悬架动行程以及轮胎动载荷等性能指标。

6 结论

本文以 1/2 掀背车的主动座椅悬架系统作为研究对象,利用编程软件 MATLAB/Simulink 和仿真软件 Carsim 在控制器设计和实车悬架系统建模的优势,设计基于低通滤波 PID 控制器的主动座椅悬架系统联合仿真,并以车身垂直加速度、车身俯仰加速度、前后悬架动行程和前后轮胎动载荷作为评价主动座椅悬架系统性能的标准,研究所设计的控制器对 1/2 掀背车的主动座椅悬架系统的影响。由主动座椅悬架系统和被

动座椅悬架系统的评价指标对比可以看出,所设计的基于低通滤波 PID 控制器可以显著提高车辆的整体性能,进而有效改善掀背车的驾驶安全性和乘坐舒适性。

参 考 文 献

- [1] HROVATA D. Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications[J]. Automatica, 1997, 33(10): 1781-1817.
- [2] 桂航, 钟绍华, 张艺腾. 基于整车十自由度模型的商用车驾驶室半主动悬架系统研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(18): 258-264.
- [3] 张俊红, 洪刘生, 杨文钊, 等. 车辆悬架系统及其性能评价综述[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(6): 147-153.
- [4] CAO J T, LIU H H, LI P, et al. State of the art in vehicle active suspension adaptive control systems based on intelligent methodologies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(3): 392-405.
- [5] 王秀梅, 张庆涛, 王雨. 采用混合算法优化车辆被动悬架参数及仿真[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 24-28.
- [6] HU Y L, CHEN M Z Q, XU S Y, et al. Semiactive inerter and its application in adaptive tuned vibration absorbers[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 25(1): 294-300.
- [7] 杨艺, 陈龙, 汪若尘, 等. 车辆半主动悬架广义天棚理论控制研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 66-74.
- [8] YUVAPRIYA T, LAKSHMI P, RAJENDIRAN S. Vibration suppression in full car active suspension system using fractional order sliding mode controller[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(4): 1-11.
- [9] ZHANG J X, LI Y M. Neuro-adaptive output-feedback optimized stochastic control for the active suspension systems with state constraints[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2022, 36(1): 38-68.
- [10] LIN J, AND LIAN R J. Intelligent control of active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 618-628.
- [11] ALY A A, SALEM F A. Vehicle suspension systems control: A review[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2013, 2(2): 46-54.
- [12] LI K W, TONG S C. Observer-based finite-time fuzzy adaptive control for MIMO non-strict feedback nonlinear systems with errors constraint[J]. Neurocomputing, 2019, 341: 135-148.
- [13] 蒋珍, 田海丽. 模糊控制在变风量空调 VAVBOX 中的设计研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2012, 25(1): 42-45+56.
- [14] LI Y M, LI K W, TONG S C. Adaptive neural network finite-time control for multi-input and multi-output nonlinear systems with positive powers of odd rational numbers[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2019, 31(7): 2532-2543.
- [15] BAI W W, ZHOU Q, LI T S, et al. Adaptive reinforcement learning neural network control for uncertain nonlinear system with input saturation[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2019, 50(8): 3433-3443.
- [16] YANG Z B, LU C L, SUN X D, et al. Study on active disturbance rejection control of a bearingless induction motor based on an improved particle swarm optimization-genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 7(2): 694-705.
- [17] DI F D, CHEN L, SUN L M. Optimal design of dampers for multi-mode cable vibration control based on genetic algorithm[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(4): 2150058.
- [18] ZHANG J X, LI Y M. Adaptive fuzzy control for active suspension systems with stochastic disturbance and full state constraints[C]. // 2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI), December 18-20, 2020, IEEE, Hangzhou, China, 2020: 380-385.
- [19] HAMZA A, YAHIA N B. Heavy trucks with intelligent control of active suspension based on artificial neural networks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2021, 235(6): 952-969.
- [20] ZHOU C, LIU X H, CHEN W, et al. Optimal sliding mode control for an active suspension system based on a genetic algorithm[J]. Algorithms, 2018, 11(12): 205.
- [21] WEI C Y, CAI Y, ZHANG K, et al. Novel optimal design approach for output-feedback H_∞ control of vehicle active seat-suspension system[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(1): 411-422.
- [22] LIU L, LI X S. Event-triggered tracking control for active seat suspension systems with time-varying full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 52(1): 582-590.
- [23] TIAN M, NGUYEN V. Control performance of suspension system of cars with PID control based on 3D dynamic model[J]. Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2020, 1(1): 1-10.
- [24] 马宝山, 刘志刚, 孙建民, 等. 自适应滤波技术在汽车悬架振动控制中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2002(4): 54-56.

- [25] YU F,ZHANG J W,CROLLA D A.A study of a Kalman filter active vehicle suspension system using correlation of front and rear wheel road inputs[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part D: Journal of Automobile Engineering,2000,214(5): 493-502.
- [26] 段虎明,石峰,谢飞,等.路面不平度研究综述[J].振动与冲击,2009,28(9): 95-101.
- [27] 孙建民,刘祥,赵国浩,等.模糊反馈增量式比例积分微分油气悬架控制[J].科学技术与工程,2021,21(34): 14814-14820.
- [28] ANG K H,CHONG G,LI Y.PID control system analysis,design and technology[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology,2005,13(4): 559-576.
- [29] KWON B,KANG D,YI K.Fault-tolerant control with state and disturbance observers for vehicle active suspension systems[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part D: Journal of Automobile Engineering,2020,234(7): 1912-1929
- [30] NA J,HUANG Y B,PEI Q Q,et al.Active suspension control of full-car systems without function approximation[J].IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2019,25(2): 779-791.

(责任编辑:周相泉)

(上接第 10 页)

- [12] GUO Y,LI X J,WANG P F.Improved results on synchronization of stochastic delayed networks under aperiodically intermittent control [J].Journal of the Franklin Institute,2021,358(9): 4950-4971.
- [13] GUO Y,DUAN M Y,WANG P F.Input-to-state stabilization of semilinear systems via aperiodically intermittent event-triggered control [J].IEEE Transactions on Control of Network Systems,2022,9: 731-741.
- [14] WANG Q Z,HE Y,TAN G Z,et al.State-dependent intermittent control of non-linear systems[J].IET Control Theory & Applications,2017,11: 1884-1893.
- [15] DING S B,WANG Z S.Synchronization of coupled neural networks via an event-dependent intermittent pinning control[J].IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics: Systems,2022,52: 1928-1934.
- [16] TAN X G,CAO J D.Intermittent control with double event-driven for leader-following synchronization in complex networks[J].Applied Mathematical Modelling,2018,64: 372-385.
- [17] GAO H Y,DONG H L,WANG Z D,et a.An event-triggering approach to recursive filtering for complex networks with state saturations and random coupling strengths[J].IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2020,31: 4279-4289.
- [18] DING S B,WANG Z S,XIE X P.Dynamic periodic event-triggered synchronization of complex networks: the discrete-time scenario[J].IEEE Transactions on Cybernetics.DOI:10.1109/TCYB.2022.3208012.
- [19] LI Q,WANG Z D,LI N,et al.A dynamic event-triggered approach to recursive filtering for complex networks with switching topologies subject to random sensor failures[J].IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2020,31: 4381-4388.
- [20] LI Q,SHEN B,WANG Z D,et al.Synchronization control for a class of discrete time-delay complex dynamical networks: A dynamic event-triggered approach[J].IEEE Transactions on Cybernetics,2019,49: 1979-1986.
- [21] WU Y B,WANG Y,LIU J,et al.Exponential synchronization of complex networks: An intermittent adaptive event-triggered control strategy[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers,2021,68: 4735-4745.
- [22] TAN Y S,XIONG M H,ZHANG B Y,et al.Adaptive event-triggered nonfragile state estimation for fractional-order complex networked systems with cyber attacks[J].IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics: Systems,2022,52: 2121-2133.
- [23] LIU B,YANG M,LIU T,et al.Stabilization to exponential input-to-state stability via aperiodic intermittent control[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2021,66: 2913-2919.
- [24] DUO Y,DUAN M Y,WANG P F.Input-to-state stabilization of semilinear systems via aperiodically intermittent event-triggered control [J].IEEE Transactions on Control of Network Systems,2022,9: 731-741.

(责任编辑:周相泉)