

半主动悬架平滑单传感器控制策略^{*}

张丽霞¹, 孔文剑¹, 危银涛^{2,3}, 潘福全¹, 陈文武^{2,3}, 田 硕¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛, 266520)

(2. 清华大学车辆与运载学院 北京, 100084)

(3. 科马智能悬架技术(青岛)有限公司 青岛, 266300)

摘要 传统的单传感器控制算法由于阻尼力的跳跃易导致车身加速度发生高频抖振现象。针对此问题, 首先, 建立了二自由度模型, 设计了一种平滑单传感器控制算法, 使得输出的阻尼力更为平缓; 其次, 为使算法可以根据车辆和路面不同灵活调节, 在算法中引入 2 项可调参数, 并使用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, 简称 PSO) 进行参数优化, 以保证算法在各工况下的性能; 然后, 在随机激励和冲击激励路面工况下, 运用 Matlab/Simulink 软件进行仿真; 最后, 在 B 级路面 80 km/h 车速和减速带工况下进行 1/4 台架试验。仿真和试验结果表明: 在 B 级路面各车速下, 平滑单传感器控制算法的车身加速度均方根值较原单传感器控制降低 4.1%, 冲击激励下的振动计量值降低 5.4%; 台架试验中平滑单传感器算法的加速度均方根值较单传感器算法降低约 14.5%, 减速带路面下的振动计量值降低 5.0%; 提出的算法能显著降低车身加速度, 并避免系统的高频振动。

关键词 半主动悬架; 参数优化; 硬件在环; 单传感器控制

中图分类号 TH113; U463

0 引言

悬架的性能对车辆行驶的平顺性和安全性都有很大影响, 半主动悬架具有结构简单、能耗低、鲁棒性好等优点, 在性能与成本之间提供了一个良好的平衡, 具有广泛的工程应用前景^[1-3]。对于半主动悬架控制算法的理论研究涉及到很多先进控制方法。Ahmadian 等^[3]提出使用连续函数和引入悬架相对速度 2 种方式, 用于减少阻尼力的跳跃。Tang 等^[4]建立了一个状态测试器来实时估计悬架状态, 设计了基于状态观测器的 TS 模糊控制器。Liu 等^[5]采用改进的深度确定性策略梯度算法来实现对半主动悬架的控制, 进一步提高乘坐舒适性。Du 等^[6]基于磁流变减振器提出了一种静态输出反馈 H_∞ 控制方法, 可以实现良好的控制性能。Morato 等^[7]基于 7 自由度模型设计了快速实时线性变参数模型预测控制系统。Qin 等^[8]提出了基于道路轮廓估计的悬架混合控制策略。Yao 等^[9]开发了一种半主动悬架的滑模控制器。

目前, 半主动悬架控制策略的研究大都计算过程繁琐, 实际应用困难。张磊等^[10]设计了一种改进型天棚阻尼半主动控制算法, 可以降低车身加速度,

且具有计算量小、简单实用的优点。杨艺等^[11]提出广义天棚理论, 相比传统被动悬架和天棚阻尼控制悬架, 能够进一步提升悬架性能。上官郑伟^[12]基于线性天棚控制 (sky hook, 简称 SH) 算法和线性加速驱动阻尼 (acceleration drive damping, 简称 ADD) 算法设计了 PSO-SH-ADD 算法, 可以抑制车身振动。基于 SH-ADD 混合控制, Savaresi 等^[13]提出了单传感器控制算法, 该算法可以看做是 Mix-SH-ADD 控制算法中 SH 和 ADD 控制策略的近似, 性能较 Mix-SH-ADD 稍有损失, 但仅需 1 个加速度传感器即可实现, 因此在工程中具有突出的优势。Spelta 等^[14]在单传感器控制算法的基础上, 研究了在四轮汽车上移除传感器来进一步降低成本, 结果表明, 使用估计的加速度传感器值会受到高频噪声的影响, 但通过闭环控制可以有效进行补偿。Peng 等^[15]提出了一种新的分频器作为单传感器控制的开关, 并验证了其可行性和有效性。孟金^[16]提出了一种改进的单传感器控制算法, 能够避免积分导致的误差, 实际控制效果与原控制算法相当。诸多基于经典天棚控制理论开发的算法运用开关的方式对半主动悬架进行控制, 会引起系统的抖振, 对车辆的平顺性和安全性产生不利影响。

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51505244, 51761135124, 11672148); 山东省重点研发计划资助项目 (2018GGX105009)

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-10-22

针对上述半主动悬架控制算法存在的问题,本研究在单传感器控制的基础上进行改进,基于根据所属频带施加不同阻尼控制的思想,提出平滑单传感器控制算法。该算法引入 2 项可调参数,通过粒子群算法调整参数值,以达到最优的控制效果。提出的算法计算过程简明,并通过仿真和试验验证,该算法能够有效避免阻尼力的跳跃,获得更好的平顺性。

1 悬架系统传递特性分析

二自由度模型不仅具有车身部分的动态特性,还可以反映车轮部分产生高频共振时的特性,能够较好地模拟汽车悬架的真实情况。

1.1 悬架系统动力学模型

二自由度悬架模型如图 1 所示。其中: m_b 为簧载质量; m_w 为非簧载质量; k 、 k_t 分别为悬架弹簧刚度和车轮刚度; c 为悬架阻尼系数; F_{damp} 为可变阻尼力; q 为路面不平度激励; x 、 x_t 分别为车身和车轮的垂直位移。

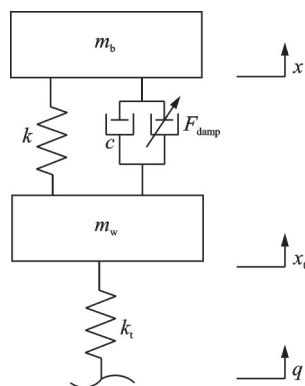


图 1 二自由度悬架模型

Fig.1 2-degree of freedom suspension model

取系统状态变量 $X=[x \dot{x} x_t \dot{x}_t]^T$, 输出变量 $Y=[\dot{x} \dot{x}_t x \ddot{x}]^T$, 半主动悬架模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{X}=AX(t)+BU \\ Y=CX(t)+DU \end{cases} \quad (1)$$

其中: $A=$
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{m_b} & -\frac{c}{m_b} & \frac{k}{m_b} & \frac{c}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{m_w} & \frac{c}{m_w} & -\frac{k+k_t}{m_w} & -\frac{c}{m_w} \end{bmatrix};$$

$$B=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_b} & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_w} & \frac{k_t}{m_w} \end{bmatrix}; C=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{m_b} & -\frac{c}{m_b} & \frac{k}{m_b} & \frac{c}{m_b} \end{bmatrix};$$

$$D=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_b} & 0 \end{bmatrix}; U=\begin{bmatrix} F_{damp} \\ q \end{bmatrix}。$$

车辆模型参数见表 1。其中: $c_{passive}$ 为对照被动悬架的阻尼系数。

表 1 车辆模型参数

Tab.1 Vehicle model parameters

参数	数值
m_b/kg	662.5
m_w/kg	60
$k_t/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	340
$k/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	44
$c_{passive}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	2 600

基于阻尼器测功机的测试数据,建立输出阻尼力、活塞速度和电流之间的映射关系。为保证仿真结果的准确性,将试验数据输入 Simulink 软件作为模型中阻尼力 F_{damp} 的输出。减振器平衡点处的速度特性曲线如图 2 所示。

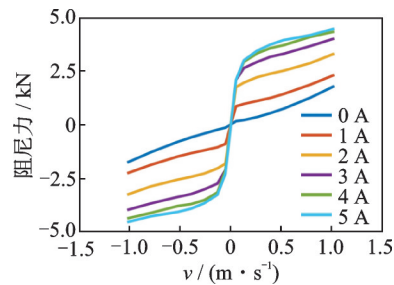


图 2 减振器平衡点处的速度特性曲线

Fig.2 Speed characteristic curve at the balance point of shock absorber

由图 2 可以看出,在相同速度下,减振器输出的阻尼力随电流增大而增大,在电流达到 4 A 时减振器输出的阻尼力已接近饱和。为保证减振器的使用寿命,控制过程中输出的最大电流选择为 4 A。

1.2 悬架系统传递特性

为研究阻尼对二自由度振动系统传递特性的影响,采用车身加速度、悬架动挠度及车轮动载荷作为

评价车辆舒适性和操稳性的重要指标。评价指标幅频特性曲线如图3所示。其中: $\ddot{x}$ 为车身部分位移的二阶导数; $\dot{q}$ 为路面不平度的一阶导数; G 为车轮静载。图3(a)中 f_1, f_2, f_3 为车身加速度传递函数的不动点频率^[17],不随阻尼的改变而改变。由于半主动

悬架的阻尼力实时变化,悬架系统阻尼力高度非线性,因此半主动悬挂不受不动点的约束。 f_1 可以表示为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 8m_b m_w k k_t}}{2m_b m_w}} \quad (2)$$

其中: $\beta = 2(m_b + m_w)k + m_b k_t$ 。

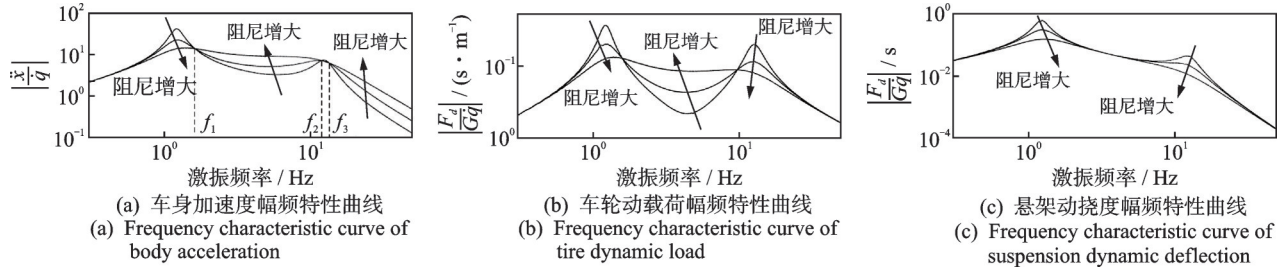


图3 评价指标幅频特性曲线

Fig.3 Evaluation index amplitude frequency characteristic deflection curve

从频域角度来看,当 $f < f_1$ 或 $f_2 < f < f_3$ 时,车身加速度的传递率随阻尼的增大而减小,这在共振区的体现尤为明显;其他频率处传递率随阻尼的增大而增大。实际控制中,虽然应在车轮共振区施加大阻尼,但其频率大都在10 Hz以上,且对于行驶平顺性的影响较小,因而控制中大都选取 f_1 附近点作为高低频的分界点,即需在 $f < f_1$ 时施加大阻尼,在 $f \geq f_1$ 时施加小阻尼。

2 基于平滑单传感器的半主动悬架控制

为解决短时间内大幅切换阻尼导致的抖振与性能恶化问题,提出了平滑单传感器控制方法,即

$$c_{in} = c_{nom} - k_{1-sensor}(\ddot{x}^2 - \alpha^2 \dot{x}^2) \quad (3)$$

其中: c_{in} 为控制算法输出,其值在阻尼最大值 c_{max} 与最小值 c_{min} 之间,即 $c_{in} \in [c_{min}, c_{max}]$; c_{nom} 为控制算法的偏移项; $k_{1-sensor}$ 为算法增益; α 为频段选择系数。

c_{nom} 主要有以下作用:抵消减振器与车辆不匹配导致的误差;在车辆需要较好操稳性时提供基础阻尼;在输出值为负时提供一定的控制余量。

将瞬时频率与频段选择系数差值的相反数与算法增益相乘作为阻尼的输出,瞬时频率与所选取的频段选择系数差值越大,则输出的阻尼值越大。

文献[18-19]提出的SH-ADD控制采用 $(\ddot{x}^2 - \alpha^2 \dot{x}^2)$ 作为切换控制算法的选择器,其中 $\alpha = 2\pi f_{cross}$, f_{cross} 为高频与低频的分界频率,其数值选择为SH控制与ADD控制的交点对应频率,可以在低频时使用SH控制,在高频时使用ADD控制,从而达到更好的控制效果。因此,本研究选用 $\alpha = 2\pi f_{cross}$ 作为控

制器的频选系数。

$\alpha = 10$ 时,单传感器控制与平滑单传感器控制输出模型见图4。其中,输出的阻尼为名义阻尼值。

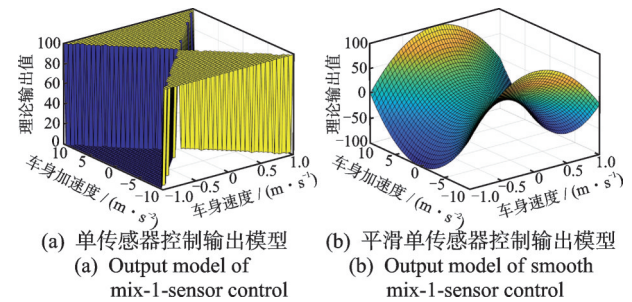


图4 单传感器控制与平滑单传感器控制输出模型

Fig.4 Output model of mix-1-sensor control and smooth mix-1-sensor control

图4(a)为传统的单传感器控制的输出模型,其基于频段选择器的判断直接赋予大小阻尼,在有噪声和延迟的情况下会因输出阻尼改变幅度过大而出现明显抖振,进而恶化悬架性能。图4(b)为没有偏移与增益的平滑单传感器控制的输出模型,该算法可以显著减少阻尼力跳跃,得到平缓的阻尼力输出。

3 控制算法性能分析

根据车身加速度幅频特性曲线,想要获得较低的车身加速度,需要在车身共振区施加大阻尼,在中高频时施加小阻尼。本研究根据不同工况选取了控制参数,分别在随机激励和冲击激励下进行仿真分析。为验证算法的有效性,选取单传感器控制算法及SH算法进行比较。

3.1 控制参数选取

由于频繁地大幅切换阻尼系数会恶化行驶的平顺性,因此本研究给定的 $c_{\max}$ 在B级路面取值为30,C级路面取值为40。 c_{nom} 的增加会提高基础阻尼,一定程度上恶化平顺性; c_{nom} 过小则会导致悬架动挠度过大。为给控制算法输出一定的余量,各工况下的 c_{nom} 均取值为10。

将各评价指标进行归一化处理后,通过 q_1 、 q_2 、 q_3 对各个评价指标赋予权重并建立目标函数,即

$$J = q_1 \frac{\ddot{x}_{sa}}{\ddot{x}_{pa}} + q_2 \frac{F_{d-sa}}{F_{d-pa}} + q_3 \frac{f_{d-sa}}{f_{d-pa}} \tag{4}$$

其中: q_1 、 q_2 及 q_3 分别为加权加速度权重、车辆动载荷权重及悬架动挠度权重,本研究期望获得舒适性较好的算法^[12],权重取值分别为0.75、0.15和0.1; $\ddot{x}_{sa}$ 、 $\ddot{x}_{pa}$ 分别为半主动悬架和被动悬架的加权加速度均方根值; F_{d-sa} 、 F_{d-pa} 分别为半主动悬架和被动悬架的车轮动载荷均方根值; f_{d-sa} 、 f_{d-pa} 分别为半主动悬架和被动悬架的动挠度均方根值。

通过粒子群算法获取不同路面及车速下 $k_{1-\text{sensor}}$ 的最佳取值,如表2所示。

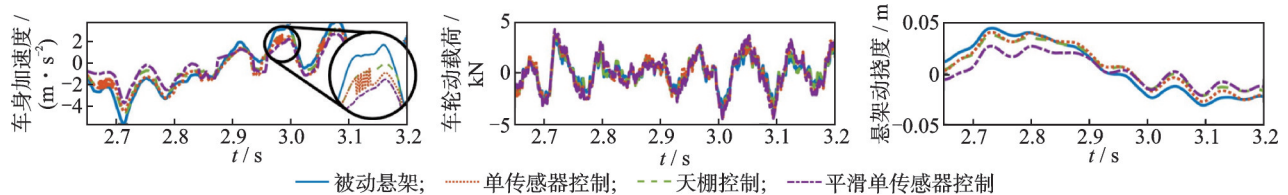


图5 C级路面80 km/h仿真结果对比
Fig.5 Comparison of simulation results on class C pavement at 80 km/h

表3 各项指标的均方根值

Tab.3 Root mean square values of each index			
控制算法	车身加速度/ (m·s ⁻²)	车轮 动载荷/N	悬架 动挠度/m
被动悬架	1.048	1 221.4	0.013 0
天棚控制	0.936	1 402.0	0.012 1
单传感器控制	0.942	1 475.8	0.014 0
平滑单传感器控制	0.902	1 523.1	0.012 0

为了验证该算法在各种工况下的控制效果,将车辆模型分别放在B级、C级路面不同车速下进行仿真。B级、C级路面不同车速评价指标均方根值分别如图6、7所示。

可以看出:各控制算法都具有一定的控制效果,在不同级别路面上的控制效果也有很好的一致性;平滑单传感器控制在全车速下车身加速度最小,比

表2 不同路面及车速下 $k_{1-\text{sensor}}$ 的最佳取值

Tab.2 Optimal Value of $k_{1-\text{sensor}}$ under different pavements and vehicle speeds

路面等级	车速/(km·h ⁻¹)								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
B级	42.0	40.6	34.4	39.0	25.4	24.0	21.0	19.6	18.6
C级	34.2	29.6	27.6	15.1	11.2	11.2	9.7	9.8	8.2

3.2 随机激励响应

以C级路面80 km/h工况为例进行仿真,结果对比如图5所示。各项指标的均方根值见表3。

由图5可以看出,平滑单传感器控制算法的车身加速度和悬架动挠度的绝对值小于其他控制算法,说明该算法对这2项指标有很好的控制效果,但对车轮动载荷的控制稍差。从放大图中可以看出,单传感器算法的车身加速度曲线在3 s左右出现上下波动,而平滑单传感器控制算法的加速度曲线平滑,说明提出的控制方法能够有效避免车身加速度的高频抖振。由表3可以看出:平滑单传感器控制的车身加速度均方根值比单传感器控制降低4.2%;悬架动挠度比单传感器控制降低14.3%;车轮动载荷比单传感器控制升高3.2%。

单传感器控制降低了4.1%;由于天棚控制多加装了位移传感器,可以通过获取的轮胎信息施加控制,因此对车轮动载荷取得了最佳抑制效果,平滑单传感器控制比单传感器控制增加约3.5%,比天棚控制增加约8.7%;平滑单传感器控制对悬架动挠度达到了与天棚控制相近的抑制效果,比单传感器控制降低约14.7%,比被动悬架控制降低约13.7%。

3.3 随机激励响应频域分析

以C级路面80 km/h工况为例进行频域分析,得到如图8所示的各控制算法评价指标的功率谱密度(power spectral density,简称PSD)曲线。

由图8可以看出:在1~1.6 Hz左右的车身共振区,平滑单传感器控制算法的车身加速度和悬架动挠度得到更好的抑制,控制效果最佳,三者的车轮动

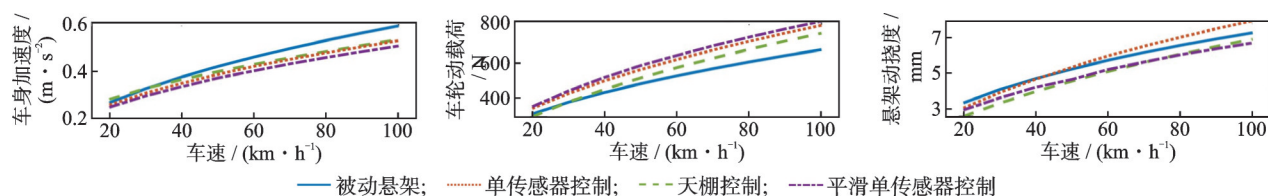


图6 B级路面不同车速评价指标均方根值

Fig.6 Root mean square values of evaluation indices on class B pavement at different speeds

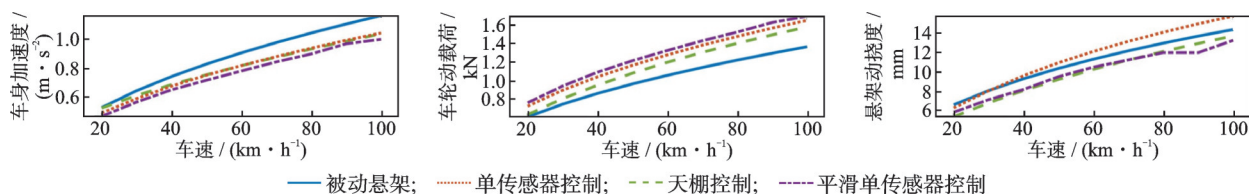


图7 C级路面不同车速评价指标均方根值

Fig.7 Root mean square values of evaluation indices on class C pavement at different speeds

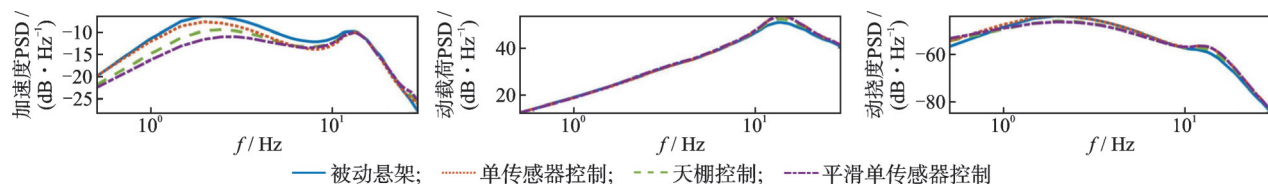


图8 各控制算法评价指标的功率谱密度曲线

Fig.8 Power spectral density curves of evaluation indices for various control algorithms

载荷差距不大;在10~15 Hz左右的车轮共振区及更高的频率范围内,平滑单传感器控制与另外2种算法对车身加速度控制效果相近,车轮动载荷和悬架动挠度稍差于天棚控制,与单传感器算法接近。

3.4 冲击激励响应

依照 GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》,使用振动计量值(vibration does value,简称VDV)和最大加速度响应来评价遇到过大脉冲的

影响。振动计量值的计算式为

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{1/4} (\text{m/s}^{1.75}) \quad (5)$$

其中: $a_w(t)$ 为加权加速度时间历程; T 为振动的分析时间。

选取波长为400 mm、振幅为40 mm的圆弧作为冲击激励,模拟车辆在30 km/h时经过减速带的工况。冲击激励仿真结果对比如图9所示。冲击激励评价指标见表4。

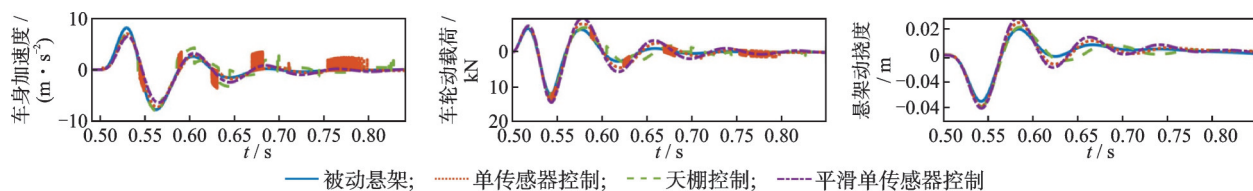


图9 冲击激励仿真结果对比

Fig.9 Comparison of shock excitation simulation results

表4 冲击激励评价指标

Tab.4 Evaluation indices of shock excitation

控制算法	振动计量值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75}$)	最大加速度响应/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
被动悬架	3.235	8.086
天棚控制	3.111	6.937
单传感器控制	3.057	6.940
平滑单传感器控制	2.890	6.777

由表4可以看出,平滑单传感器控制的振动计量值较单传感器控制降低约5.4%,最大加速度响应与单传感器控制算法接近,仅降低2.3%。由图9可以看出,在经过减速带的一段时间内,单传感器控制的车身加速度和车轮动载荷的曲线都出现了高频率的上下波动,说明悬架系统出现抖振,而平滑单传感器控制有效避免了该情况发生。

4 半主动悬架台架试验

4.1 试验平台的建立

试验装置如图 10 所示,包括激振台、车辆 1/4 试验台架、dSPACE 控制器、电子控制器单元(electronic control unit,简称 ECU)。为保证试验的正确性,台架簧载质量和非簧载质量被限制在垂直方向移动。试验台架上装有 1 个角度传感器和 1 个加速度传感器。角度传感器获取悬架的位移,通过微分获取悬架的相对速度。为便于调试,ECU 仅用于接收传感器的信号并发送给 dSPACE 控制器进行后续处理,同时接收 dSPACE 传回的施加电流值的命令来驱动减振器。dSPACE 控制器用于运行控制算法,接收来自 ECU 的加速度信号和位移信号,处理计算后得到的电流命令发送到 ECU 中^[20]。

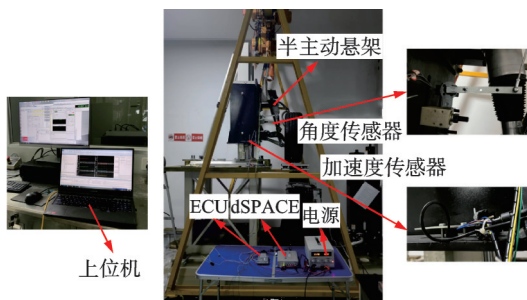


图 10 试验装置

Fig.10 Experimental device

4.2 试验验证

以 B 级路面 80 km/h 的随机激励作为输入进行试验,得到的试验结果如图 11 所示。由图可以看出,平滑单传感器在车轮共振区附近之外的频率范围内取得了最佳控制效果,较单传感器控制有明显提升。在试验工况下,被动悬架的加速度均方根值为 0.862 m/s^2 ,天棚控制为 0.710 m/s^2 ,单传感器控制为 0.761 m/s^2 ,平滑单传感器控制为 0.651 m/s^2 。平滑单传感器算法的加速度均方根值较单传感器算法降低约 14.5%,较被动悬架降低 24.5%。

对控制算法进行频域分析后,由图 11(b)可以看出,除车轮共振区附近之外,平滑单传感器控制算法都取得了较好的控制效果。由于车轮共振频率一般在 10 Hz 以上,动载荷低谷时间不超过 50 ms,所以车轮共振不会明显恶化车辆的操纵稳定性。

以减速带路面 30 km/h 的激励进行试验,得到减速带路面的车身加速度试验结果对比如图 12 所示。减速带路面评价指标见表 5。

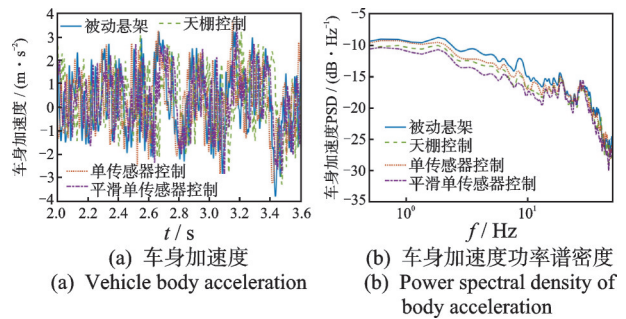


图 11 B 级路面试验结果

Fig.11 Test results of class B pavement

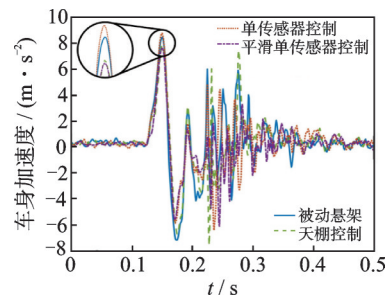


图 12 减速带路面的车身加速度试验结果对比

Fig.12 Comparison of body acceleration test results under deceleration belt pavement

表 5 减速带路面评价指标

Tab.5 Evaluation index of deceleration belt pavement test

控制算法	振动计量值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75}$)	最大加速度响应/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
被动悬架	2.365	8.465
天棚控制	2.143	7.840
单传感器控制	2.091	8.793
平滑单传感器控制	1.986	7.769

由图 12 和表 5 可以看出:平滑单传感器控制算法的振动计量值比单传感器控制算法降低约 5.0%,比被动悬架降低约 16.0%;平滑传感器控制的最大加速度响应最小,比单传感器控制降低约 11.6%,与天棚控制效果接近。

5 结 论

1) 平滑单传感器控制算法可使输出阻尼力变平缓,在实际应用中仅需获取车身加速,控制更加便捷可靠。

2) 在 B 级路面上,平滑单传感器控制的车身加速度均方根值较单传感器控制降低约 4.1%,悬架动挠度降低约 14.7%,但车轮动载荷增加约 3.5%。在冲击激励下,平滑单传感器控制的振动计量值较单传感器控制降低约 5.4%,最大加速度响应接近,单传感器控制引起的抖振得到很好抑制,表明平滑单传感器控制在各工况下都具有良好的控制性能。

3) 在台架试验中,平滑单传感器控制的车身加速度均方根值较单传感器控制降低约14.5%,较被动悬架降低24.5%。减速带路面下,振动计量值较单传感器控制降低约5.0%,最大加速度响应较单传感器控制降低约11.6%。结果表明,提出的控制算法有较好的控制效果。

参 考 文 献

- [1] CHAKRABORTY J, JIMENEZ I, RODRIGUEZ S A, et al. Skyhook: towards an arrow-native storage system[C]//2022 22nd IEEE International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid). Taormina, Italy: IEEE, 2022: 81-88.
- [2] CORNO M, GALLUPPI O, PANZANI G, et al. Design and validation of a full body control semi-active suspension strategy for a supercar[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(5): 667-672.
- [3] AHMADIAN M, SONG X, SOUTHWARD S C. No-jerk skyhook control methods for semiactive suspensions[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126(4): 580-584.
- [4] TANG X, DU H P, SUN S S, et al. Takagi - sugeno fuzzy control for semi-active vehicle suspension with a magnetorheological damper and experimental validation [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 291-300.
- [5] LIU M, LI Y B, RONG X W, et al. Semi-active suspension control based on deep reinforcement learning [J]. IEEE Access, 2020, 8: 9978-9986.
- [6] DU H P, SZE K Y, LAM J. Semi-active H_∞ control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3/4/5): 981-996.
- [7] MORATO M M, NGUYEN M Q, SENAME O, et al. Design of a fast real-time LPV model predictive control system for semi-active suspension control of a full vehicle[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(3): 1196-1224.
- [8] QIN Y C, DONG M M, REZA L, et al. Adaptive hybrid control of vehicle semiactive suspension based on road profile estimation[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015(1): 636739.
- [9] YAO J L, SHI W R, ZHENG J Q, et al. Development of a sliding mode controller for semi-active vehicle suspensions[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 19(8): 1152-1160.
- [10] 张磊, 张进秋, 彭志召, 等. 车辆半主动悬架改进型天棚阻尼控制算法[J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 931-935.
ZHANG Lei, ZHANG Jinqiu, PENG Zhizhao, et al. Improved sky-hook damping control algorithm for semi-active vehicle suspensions[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(8): 931-935.(in Chinese)
- [11] 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.
YANG Yi, CHEN Long, WANG Ruochen, et al. Semi-active suspension control based on the general theory of skyhook control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(22): 66-74.(in Chinese)
- [12] 上官郑伟. 汽车磁流变半主动悬架控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [13] SAVARESI S M, SPELTA C. A single-sensor control strategy for semi-active suspensions [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 143-152.
- [14] SPELTA C, DELVECCHIO D, SAVARESI S M, et al. Analysis of a sensor reduction in a semi-active suspension system for a 4-wheel vehicle[C]//Proceedings of the ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference. Cambridge, Massachusetts, USA: ASME, 2010: 757-763.
- [15] PENG Z Z, ZHANG J Q, ZHANG L, et al. Magnetorheological semi-active suspension system for a tracked vehicle [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 482: 150-154.
- [16] 孟金. 车辆半主动悬架控制系统开发及优化控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [17] 彭志召, 张进秋, 张建, 等. 磁流变半主动悬架试验研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(5): 561-567.
PENG Zhizhao, ZHANG Jinqiu, ZHANG Jian, et al. Experimental study on a semi-active magnetorheological suspension[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(5): 561-567. (in Chinese)
- [18] SAVARESI S M, SPELTA C. Mix-1-sensor: a control strategy for semi-active suspension [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2007, 40(10): 367-374.
- [19] SAVARESI S M, SPELTA C. Mixed sky-hook and ADD: approaching the filtering limits of a semi-active suspension[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 129(4): 382-392.
- [20] NEGASH B A, YOU W, LEE J, et al. Semi-active control of a nonlinear quarter-car model of hyperloop capsule vehicle with skyhook and mixed skyhook-acceleration driven damper controller [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(2): 619-626.



第一作者简介:张丽霞,女,1978年7月生,博士、教授。主要研究方向为汽车系统动力学及控制。曾发表《Multi-objective optimization study of vehicle suspension based on minimum time handling and stability》(《Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers》2020, Vol.234, No.9)等论文。
E-mail: zlxzhanglixia@163.com