

文章编号:1006-1355(2018)03-0066-06

考虑能控特性的天棚阻尼半主动控制算法性能分析

彭 虎¹, 张进秋², 张 雨², 彭志召², 韩朝帅³, 王 辉⁴

(1. 陆军装甲兵学院 技术保障工程系, 北京 100072;

2. 陆军装甲兵学院 装备试用与培训大队, 北京 100072;

3. 63960 部队, 北京 102205;

4. 66222 部队, 北京 102202)

摘要:为实现电磁作动器(Electric Actuator, EA)与磁流变减振器(Magneto-rheological Damper, MRD)并联组成的复合式电磁悬挂(Composite Electrical-magnetic Suspension, CES)在半主动馈能工况条件下的自供能,需同时考虑降低车身垂直加速度及降低控制功耗两方面因素。为解决算法控制性能评价的问题,在原有评价指标的基础上,提出能控比(Energy Consume and Control Performance Ratio, ECR)的概念并对其进行理论分析。在C级随机路面条件下,分析车速对天棚ON-OFF、连续天棚及改进型天棚3种天棚阻尼半主动控制算法的ECR的影响,并从时域的角度对ECR评价3种算法控制性能的有效性进行验证,得到最优天棚控制算法。结果表明:天棚ON-OFF、改进天棚及连续天棚对乘坐舒适性性能的改善依次增大;ECR可有效对3种控制算法性能进行评价,连续天棚半主动控制算法综合控制性能最优,适用于CES的自供能。

关键词:振动与波;天棚阻尼;半主动;复合式电磁悬挂;能控比

中图分类号:U436.33;O328

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.03.012

Performance Analysis of Skyhook Damping Semi-active Control Algorithm Considering ECR

PENG Hu¹, ZHANG Jinqiu², ZHANG Yu², PENG Zhizhao²,
HAN Chaoshuai³, WANG Hui⁴

(1. Department of Technical Support Engineering, Institute of Army Armored Force,
Beijing 100072, China;

2. Brigade of Equipment Trail and Training, Institute of Army Armored Force, Beijing 100072, China;

3. Troop No. 63960 of PLA, Beijing 102205, China; 4. Troop No. 66222 of PLA, Beijing 102202, China)

Abstract : In order to realize the energy self-supply of a composite electrical-magnetic suspension (CES), which is constituted by an electric actuator (EA) and a magneto-rheological damper (MRD) in parallel connection form, under the working condition of semi-active control and energy-regeneration, it is necessary to reduce the vertical acceleration of the vehicle's body and the control energy consuming. To solve the problem of control performance evaluation of the algorithm, the concept of energy consume and control performance ratio (ECR) is put forward and theoretically analyzed based on the original evaluation indexes. Under the condition of random road surface of grade C, the influence of vehicle's velocity on the ECRs of three skyhook damping semi-active control algorithms, such as skyhook ON-OFF, constant skyhook and improved skyhook, is analyzed. The effectiveness of the ECR for evaluating the performances of the three control algorithms is verified from the viewpoint of time domain. And the optimal skyhook control algorithm is obtained. The result indicates that the improvement effects of the skyhook ON-OFF, the constant skyhook and the improved skyhook semi-active control algorithms on the performance of ride comfort increase successively, the ECR can evaluate the performance of the three control algorithms effectively, and the constant skyhook algorithm has the best comprehensive control performance and is suitable for the self-power supply of CES.

Keywords : vibration and wave; skyhook Damping; semi-active; composite electrical-magnetic suspension (CES); energy consume and control performance ratio (ECR)

收稿日期:2017-07-28

基金项目:军队科研计划项目

作者简介:彭虎(1989-),男,博士研究生,四川省中江县人,
研究方向为车辆振动控制及能量回收。

E mail: p233201222007h@126.com

悬挂系统用以支撑车体,缓和路面冲击,起到隔振的作用^[1-2]。通常将悬挂系统视为弹性元件和阻尼元件的复合结构,传统被动悬挂由于阻尼和刚度不可调,且悬挂能量均通过阻尼以热能的形式耗散掉,难以满足对振动控制和馈能节能的需求^[3-4]。以旋转电机+磁流变减振器(Magneto-rheological Damper, MRD)组成的复合式电磁悬挂(Composite Electrical-magnetic Suspension, CES)可根据路面状况及控制需求,实现被动馈能、主动控制、半主动馈能及半主动控制等多种工况,满足对悬挂系统振动控制效果和能量回收性能的双重需求,具有良好发展前景^[5-6]。在该CES工作于半主动馈能工况时,若馈能的能量大于控制MRD消耗的能量,即可实现自供能^[7]。为了提高自供能能力,可以从两个方面来考虑:一是基于一定的振动控制性能需求的前提,降低控制能耗;二是提高馈能功率和馈能效率,使得回收能量足以满足振动控制能耗需求。考虑条件一,通常学者们在研究控制算法的时候,并未考虑到控制所需消耗的电,对于馈能及自供能型悬挂,有必要对算法的减振效果及能耗特性两方面均加以考虑。

基于上述分析,以降低车身垂直加速度及降低控制能耗为目的,提高车辆乘坐舒适性及CES的自供能,以能控比(Energy Consume and Control Performance Ratio, ECR)指标描述该两方面的控制需求并对其概念进行分析;最后,对天棚阻尼ON-OFF半主动控制、天棚阻尼连续半主动控制和改进型天棚阻尼半主动控制3种天棚控制算法的综合性能进行分析,优选适用于CES的最优天棚半主动控制算法。

1 悬挂动力学及控制系统模型

以CES取代原车被动减振器,悬挂工作于半主动馈能工况时,EA中的旋转电机作发电机进行馈能,MRD进行半主动控制。该CES由两个执行器同时工作,因此,两者在结构上并不干涉。电机作发电机用时,线圈切割磁感线产生的安培力称之为电磁阻尼力,可以通过调节负载来调节电磁阻尼力的大小。为了分析MRD的半主动控制性能,本文将电磁阻尼力设为一个定值。CES阻尼主要包括EA的机械摩擦阻尼和电磁阻尼,以及MRD的黏滞阻尼和库仑阻尼。对MRD的控制流程为:数据采集系统采集车辆状态信息,而后由控制器给出控制信号,程控电流源给出控制电流实现MRD半主动控制。电磁阻尼馈能能量通过馈能电路存储于能量存储装置内。以垂直向上方向为正,悬挂相对速度以拉伸为正,悬挂动力学及控制系统模型如图1所示。

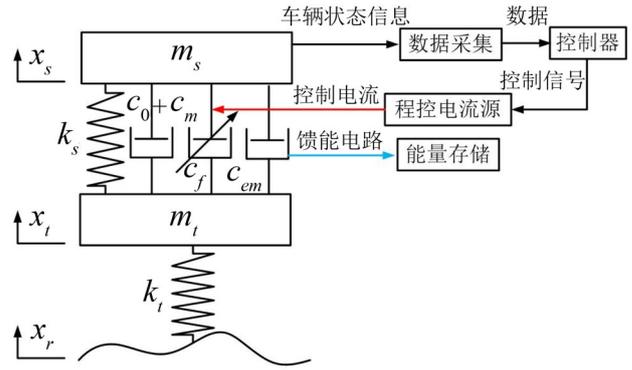


图1 悬挂动力学及控制系统模型

根据牛顿第二定律,建立运动微分方程

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s(x_s - x_t) = F \\ m_t \ddot{x}_t - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) - k_s(x_s - x_t) + k_t(x_t - x_r) = -F \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_s 为簧载质量; m_t 为非簧载质量; x_s 为车身垂直位移; x_t 为车轮垂直位移; x_r 为路面激励位移; k_s 为悬挂等效刚度; k_t 为轮胎等效刚度; c_s 为悬挂等效阻尼系数,在此包括机械摩擦阻尼系数 c_m 、MRD黏滞阻尼系数 c_0 及电磁阻尼系数 c_{em} , $c_s=c_0+c_m+c_{em}$; c_f 为原被动悬挂阻尼系数。 F 为MRD库仑阻尼力,表达式为 $F=-c_f(\dot{x}_s - \dot{x}_t)$ 。

状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) + DU(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中:状态变量 $X(t) = [\dot{x}_s, \dot{x}_t, x_s, x_t]^T$,输入向量 $U(t) = [x_r, F]^T$,输出变量 $Y(t) = [\ddot{x}_s, \ddot{x}_t, \dot{x}_s, \dot{x}_t, x_s, x_t]^T$, A 、 B 、 C 、 D 分别为对应的系数矩阵。

2 性能评价方法

2.1 评价指标设计

对车辆悬挂系统性能的评价通常以车身垂直加速度(acc)、悬挂动行程(dx)、车轮动载荷(dzh)各指标的均方根值RMS_ acc 、RMS_ dx 及RMS_ dzh 作为性能指标,对于馈能悬挂,单纯以对悬挂系统性能的提高作为评价的唯一指标并不能够对算法的控制性能进行较为准确的评价。例如,以降低 acc ,提高乘坐舒适性为目的,同等条件下,算法A可使RMS_ acc 降低20%,算法B使RMS_ acc 降低15%,但是A对应的平均控制功耗为30W,而B对应的平均控制功耗仅为5W。此时,并不能说明算法A的控制效果比B好,如果考虑控制功耗的条件下来考察算法对 acc 的抑制能力,则能更为科学地评价控制算法的性能。

对RMS_ acc 的连续积分难以用解析解直接积分,工程上常采用离散数值积分的形式代替连续积分,离散积分表达式为

$$\text{RMS}_{acc} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \ddot{x}_s^2(j)} \quad (j=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

平均控制消耗功率 \bar{P}_c 表达式为

$$\bar{P}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_f(i) [\dot{x}_s(i) - \dot{x}_i(i)]^2 \quad (4)$$

对于需要具有一定自供能能力的CES而言,保证一定减振效果的同时,降低控制能耗显得非常重要,追求振动控制效果和控制功耗的平衡。针对上述分析,提出能控比的概念,用ECR表示,其含义为控制算法平均控制消耗功率 \bar{P}_c 与对车身垂直加速度 RMS_{acc} 相比于同等条件下的被动悬挂的提高比率之比,用 λ 表示,则

$$\lambda_i = \frac{\bar{P}_{ci}}{\text{RMS}_{acc_i}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (5)$$

由于 RMS_{acc} 的取值范围为 $[0, 1]$, 而 \bar{P}_c 的取值为 $[0, \infty]$, 对 λ 的值难以在同一水准上进行量化, 而被动悬挂并没有控制消耗功率, 故被动悬挂没有 ECR。因此, 为了对 3 种控制算法的性能进行对比分析, 将 ECR 归一化。设 SH、Constant 及 ISH3 种控制算法 ECR 分别为 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 , 归一化方法是以 3 种控制算法中 ECR 值绝对值最大的作为分母, 3 个 ECR 值分别作为分子表示各自归一化后的 ECR, 用 λ'_1 、 λ'_2 及 λ'_3 表示, 则

$$\lambda'_i = \frac{\lambda_i}{\max|\lambda_i|} \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

λ'_i 取值为 $[-1, 1]$, 当取值为负时, 表示性能恶化; 当取值为正时, 表示性能提高。ECR 从 $1 \rightarrow 0$ 表示对车身垂直加速度处于抑制状态, 且越接近 0, 算法的性能越好; 而从 $-1 \rightarrow 0$ 表示车身垂直加速度处于恶化状态, 越接近 0, 表示恶化的程度越小, 性能越好。ECR 和综合性能之间的关系如图 2 所示。

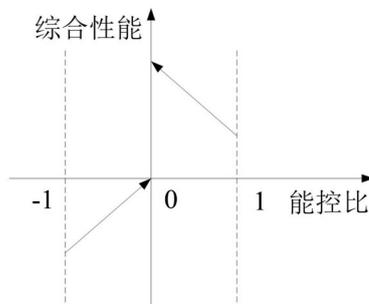


图 2 ECR 与综合性能之间的关系

图 2 可知, ECR 从 $-1 \rightarrow 0$, 表示综合性能恶化程度在逐渐减小; 而从 $1 \rightarrow 0$ 表示综合性能在不断提高, 且 ECR 为 1 时的值不为 0; 无论如何, ECR 为正都比为负的综合性能要好。采用此指标对 CES 的 3 种 MRD 半主动控制算法的综合性能进行分析。

2.2 约束条件

对算法控制效果进行分析时, 除考虑主要性能指标外, 还应考虑辅助性能指标作为约束条件。悬挂动行程影响车辆悬挂系统行驶过程中撞击限位器的概率, 关乎车辆的行驶平顺性和安全性; 而车轮动载荷表示车轮与地面间的动态作用力, 影响车轮是否离地, 关乎车辆操纵稳定性。但在本文中并不作为主要性能指标, 仅作为约束条件。

根据汽车理论^[8], RMS_{acc} 小于 1/3 倍许用行程时, 可保证悬挂撞击限位块的概率小于 0.3%, 许用行程用 $[f_d]$ 表示, 则

$$\text{RMS}_{dxc} \leq \frac{[f_d]}{3} \quad (7)$$

当 RMS_{dzh} 相对于静载的相对动载荷均方根值小于 1/3 时, 车轮离地概率小于 0.15%, $G=(m_s+m)g$, G 为车轮静载, 则

$$\frac{\text{RMS}_{dzh}}{G} \leq \frac{1}{3} \quad (8)$$

3 控制算法分析

天棚阻尼控制是美国学者 Kanopp 最早于 1974 年提出的, 其控制思想简单, 控制可靠且易于实车实现, 得到了广泛的研究和应用^[9]。常用天棚阻尼控制算法主要包括天棚 ON-OFF 控制和天棚连续控制两种, 根据天棚 ON-OFF 控制存在的缺陷, 提出改进型天棚控制, 对 3 种控制算法进行理论分析。

1) 天棚阻尼 ON-OFF 半主动控制

天棚阻尼 ON-OFF 半主动控制 (Skyhook, SH) 表达式为

$$c_f = \begin{cases} c_{f\max} & \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_i) > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $c_{f\max}$ 为 MRD 最大库仑阻尼系数。其表达式含义为当车身垂直速度与悬挂相对运动速度方向相同时, 悬挂阻尼会遏制车身垂直速度的增大, 因此需要大阻尼; 反之, 则需要小阻尼。ON-OFF 工作象限示图如图 3 所示。

SH 在一个周期内的 3/4 时间里均处于大阻尼状态, 仅有 1/4 的时间是处于小阻尼状态。执行“ON”的占比较大, 必定会增加控制能耗, 对切换时机的判定是控制性能好坏的关键, 若切换时机准确, 能有效提高控制性能, 若切换不准确, 则起不到控制效果, 甚至会恶化悬挂性能。

2) 天棚阻尼连续控制算法

天棚阻尼连续控制算法 (Constant Skyhook, Constant) 是理想主动天棚控制的半主动实现, 其设计思路是: 在车身上方假想有一个理想的天棚阻尼

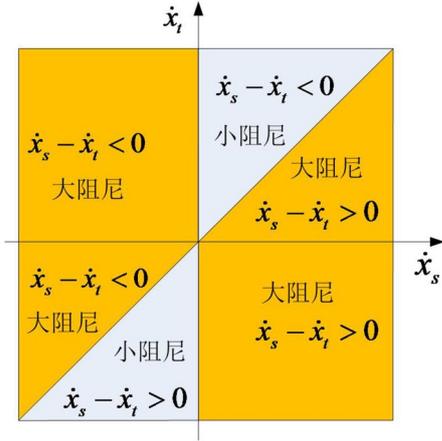


图3 ON-OFF工作象限示图

器,其阻尼系数为 c_{sky} , 由于阻尼总是阻碍相对运动

$$c_t = \begin{cases} c_{fmax} & \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) > 0 \text{ 且 } c_{sky}\dot{x}_s / (\dot{x}_s - \dot{x}_t) > c_{fmax} \\ c_{sky}\dot{x}_s / (\dot{x}_s - \dot{x}_t) & \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) > 0 \text{ 且 } 0 < c_{sky}\dot{x}_s / (\dot{x}_s - \dot{x}_t) \leq c_{fmax} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

3) 改进型天棚阻尼半主动控制

分析天棚阻尼 ON-OFF 半主动控制和天棚阻尼连续控制算法可知,由于考查乘坐舒适性是以车身垂直加速度为对象的,但这两种算法并未考虑车身垂直加速度因素,而施加天棚阻尼力来抑制车身垂直加速度对乘坐舒适性的性能改善能力有限。以车身垂直速度 \dot{x}_s 和车身垂直加速度 \ddot{x}_s 作为逻辑判断依据,若两者同向, \ddot{x}_s 的作用是使 \dot{x}_s 增大,则输出大阻尼力来抑制的 \dot{x}_s 增大,间接达到抑制 \ddot{x}_s 的目的;反之,则输出小阻尼力。 \ddot{x}_s 和 \dot{x}_s 关系如图4所示。

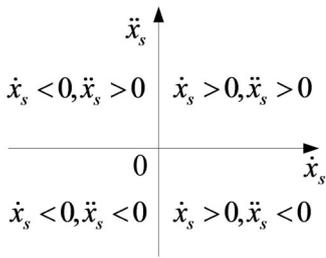


图4 \ddot{x}_s 和 \dot{x}_s 关系

根据上述分析,可得改进型天棚阻尼半主动控制(Improved Skyhook, ISH)逻辑表达式为

$$c_f = \begin{cases} c_{fmax}\dot{x}_s \cdot \ddot{x}_s > 0 \\ 0 \text{ 其他} \end{cases} \quad (11)$$

结合MRD阻尼力特性及SH半主动控制的实现方法,联合式(3)和式(5),可得ISH的控制规则如表1所示,ISH工作象限示图如图5所示。

由表1及图5可知,与SH相反,ISH在3/4的周期内均处于小阻尼状态,而仅有1/4的时间是处于大阻尼状态。增加了阻尼力判定条件之后,对于阻尼

的,故理想天棚对车身的垂直运动具有很好的抑制作用。但是理想并不能在实车上实现。因此,可通过天棚半主动控制来追踪理想天棚阻尼力。理想天棚阻尼力有可能超过MRD所能提供的最大阻尼力,因此,借鉴限界Hrovat最优控制思想^[10],当所需的阻尼力大于MRD可提供的最大阻尼力时,则MRD只能输出最大阻尼力;当所需阻尼力小于MRD可提供的最大阻尼力时,则输出所需的阻尼力。Constant可视为理想天棚的半主动实现方式,采用半主动控制力追踪主动控制力,而SH则视为连续控制的一种特殊形式。理论上而言,Constant控制连续,不存在开关控制的“颤振”现象,因此,其控制性能优于SH。Constant表达式为

切换时机判断更为准确,同时能降低控制能耗。将表1的规则整合可得ISH的表达式为

表1 ISH控制规则

	$\dot{x}_s \cdot \ddot{x}_s > 0$	$\dot{x}_s \cdot \ddot{x}_s \leq 0$
$\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) > 0$	$c_f = c_{fmax}$	$c_f = 0$
$\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) \leq 0$	$c_f = 0$	$c_f = 0$

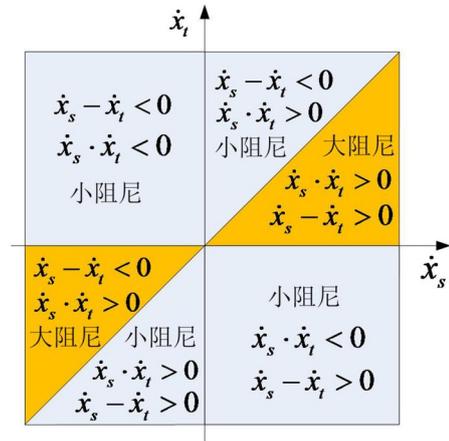


图5 ISH工作象限示图

$$c_f = \begin{cases} c_{fmax}\dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_t) > 0 \text{ 且 } \dot{x}_s \cdot \ddot{x}_s > 0 \\ c_{fmin} \text{ 其他} \end{cases} \quad (12)$$

4 仿真分析

以某型军用轮式越野车辆为对象,1/4车悬挂参数如表2所示。

随机路面激励涵盖频带宽泛,最能体现车辆实际的行驶路面条件,采用谐波叠加法生成随机路面。谐波叠加法生成路面不平度的主要思想是将路面表

表2 1/4车悬挂参数

参数	m_s/kg	m_t/kg	$k_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_t/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_0/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_m/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
参数值	317.5	45.4	22	192	400	400
参数	$c_{em}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_f/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_p/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_{sky}/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	f_d/m	G/N
参数值	300	0~2 500	2 000	3 000	0.12	3 556

示成大量随机相位的余弦级数之和^[11],表达式为

$$x_r(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2G_{x_r}(f_{mid_k}) \Delta f_k} \cos(2\pi f_{mid_k} t + \varphi_k) \quad (13)$$

式中: φ_k 为 $[0, 2\pi]$ 上的随机数,且满足均匀分布; f_{mid_k} 为频率区间 (f_1, f_2) 上第 k 个离散区间的重心频率,当车速为 v 时, $f_{mid_k} = n_{mid_k} v$; $G_{x_r}(f_{mid_k})$ 为 f_{mid_k} 处的谱密度值, $G_{x_r}(f_{mid_k}) = G_{x_r}(n_{mid_k})/v$ 。仿真步长为0.01 s,仿真时间为25 s。

4.1 速度与指标的关系

C级路面下,分析速度对RMS_acc、 \bar{P}_c 及 $\lambda'_i (i=1,2,3)$ 的影响,分别取速度值0.75, 1, ..., 10 m/s,结果如图6、图7、图8所示。

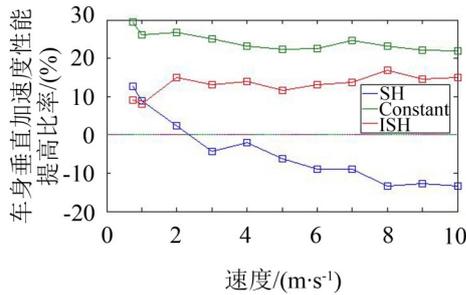


图6 速度对acc性能提高比率的影响

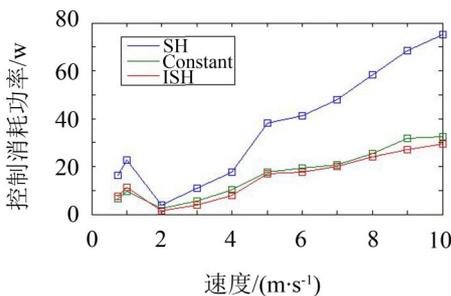


图7 速度对P_c的影响

分析图6、图7、图8,可得到如下结论:

① 在该参数及工况条件下,随着车速的提高,激励频率的增加,SH对acc的性能提高比率呈下降趋势。低速低频下处于优化状态,而在某一速度点之后,性能开始处于恶化状态,且随着车速增加,恶化状态增加。该结论说明天棚ON-OFF半主动控制性能受阻尼切换开关时机判断的影响,速度和激励频率增加后,SH对切换点的判定越来越不准确,使得性能逐渐恶化,该结论与第3节的理论分析结果

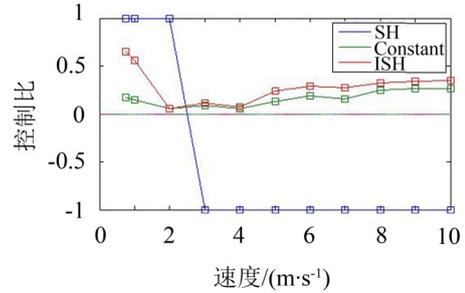


图8 速度对ECR的影响

一致;

② Constant及ISH对acc的性能提高比率基本不受速度的影响,从原理上分析可知,Constant输出力以acc为判定条件,不受阻尼切换的影响;而ISH考虑acc,可有效减少误判,因此,Constant比ISH控制性能更好。Constant性能提高比率始终在20%以上,而ISH在10%~15%之间,印证了上述结论;

③ 3种控制算法的 \bar{P}_c 趋势基本一致,均先减小,后增大。该结论说明低速低频及高速高频条件下,要追求控制性能,需要消耗更多控制能量;而在中间某一速度频段内,控制功耗存在最小点,假设为图中的2 m/s速度时刻,该点处对SH控制性能的影响较大,对Constant和ISH基本无影响,在该点处控制性能存在最优值;

④ SH控制功耗始终比Constant和ISH大,Constant和ISH基本一致,这与SH切换控制频率有关。第2节理论分析结果显示,SH在一个周期的3/4时间内处于大阻尼状态,而ISH与之相反,为1/4,Constant与切换控制无关,仅与车身垂直运动速度有关,故SH控制功耗比Constant和ISH大;

⑤ 从ECR可以看出,SH的ECR始终最大,其次是ISH,综合性能最优的是Constant,在2 m/s~4 m/s附近区间内,ECR最优,表明Constant及ISH均能在该区间趋近以最小的控制功耗取得最优的控制性能。

4.2 时域分析

同等路面条件下,激励频率越大,dxc和dzh值越大。因此,对C级路面10 m/s车速下的dxc和dzh进行分析,验证是否超过 f_d 和G的约束条件,结果如图9所示。

对RMS_acc、RMS_dxc、RMS_dzh及 \bar{P}_c 的统计

结果如表3所示。

由图9及表3可得如下结论:

① 表3可知,SH的RMS_{acc}恶化了13.33%,而Constant及ISH可分别使RMS_{acc}降低22.01%和14.88%,SH、Constant及ISH控制功耗分别为75.05 W、32.60 W和29.44 W,三者的ECR分别为-1、0.263

和0.351。故Constant的综合性能最优,ISH次之,SH在该工况下使性能恶化;

② 图9及表3可知,dxc峰值及RMS_{dxc}均未超过0.04 m的 $f_a/3$ 限制;dzh峰值未超过车轮静载荷G,而RMS_{dzh}均未超过G/3,即1 185.3 N,满足约束条件。

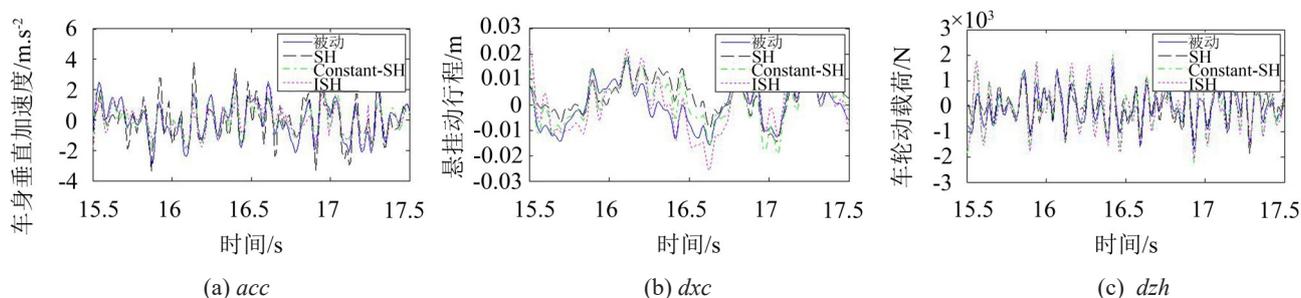


图9 悬挂各指标时域图

表3 各指标统计结果

算法	RMS _{acc} /(m·s ⁻²)	I _{rate} /(%)	RMS _{dxc} /m	I _{rate} /(%)	RMS _{dzh} /N	I _{rate} /(%)	P _c /W
被动	1.012 1	0	0.007 6	0	542.18	0	0
SH	1.147 0	-13.33	0.006 9	9.10	514.81	5.05	75.05
Constant	0.789 4	22.01	0.007 6	-0.56	655.07	-20.82	32.60
ISH	0.861 6	14.88	0.010 5	-39.68	708.48	-30.67	29.44

5 结语

(1) SH的性能依赖于大小阻尼的切换时机,其控制性能主要体现在车身共振区附近的低频段;ISH可改善SH的控制缺陷,具有更准确的判定性能,可降低控制功耗,但在大小阻尼之间进行切换的阻尼半主动控制性能有一定的控制极限,对车身垂直加速度的性能改善一般不超过15%;Constant是一种主动天棚的半主动实现形式,控制功耗与ISH相当,但对车身垂直加速度的性能改善在20%以上;

(2) ECR可有效对3种控制算法性能进行比较,在C级路面2 m/s~4 m/s附近,ISH和Constant具有最优的ECR,表明在该区间附近,两算法提高相同性能的乘坐舒适性,所需的能耗最小。Constant的综合性能始终优于ISH和SH,Constant最适合CES半主动馈能工况,可在该工况下追求自供能。

参考文献:

- [1] 金京设,陈照波,程明,等.改进阻尼特性的内置平行双线圈磁流变阻尼器研究[J].农业机械学报,2017,3,48(3):368-375.
- [2] 冯占宗,魏来生,阴运宝,等.高速履带车辆电磁悬挂功率供需矛盾分析[J].汽车工程,2016,38(5):595-599.
- [3] J SNAMINA, B SAPINSKI. Energy balance in self-powered MR damper-based vibration reduction system[J]. Technical Sciences, 2011, 59(1): 75-80.
- [4] 周炎,朱炜,芮筱亭,等.双出杆磁流变阻尼器设计与性能分析[J].噪声与振动控制,2017,37(2):178-181.
- [5] 陈昭晖,倪一清.磁流变阻尼器非参数化模型泛化能力的提高[J].振动与冲击,2017,36(6):6-151.
- [6] BABAK EBRAHIMI, HAMIDREZA BOLANDHEMMAT, MIR BEHRAD KHAMESEE, et. al. A hybrid electromagnetic shock absorber for active vehicle suspension systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(1): 311-332.
- [7] 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.
- [8] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [9] KARNOPP D, CROSBY M J, HARWOOD R A. Vibration control using semi-active force generators[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1974, 5(2): 619-629.
- [10] 欧进萍.结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M].北京:科学出版社,2003.
- [11] 彭志召,张进秋,张雨,等.车辆半主动悬挂的频域控制算法[J].装甲兵工程学院学报,2013,27(4):36-42.