

基于磁流变减振器的汽车悬架振动控制*

李 锐

(重庆邮电学院自动化学院 重庆 400065)

余 森 陈伟民 廖昌荣 董小闵

(重庆大学光电工程学院 重庆 400044)

摘要：分析了磁流变减振器特性，为了抑制汽车磁流变悬架的振动，提出了一种含有控制级和协调级的分级模糊控制。在控制级，把天棚、地棚混合控制策略与模糊智能控制策略相结合，设计了 1/4 车辆垂直振动的半主动模糊智能控制器；在协调级，设计了整车控制的协调器，根据反馈变量对整车 4 个独立模糊智能控制器输出参数进行调整。把某微型汽车的 4 只被动减振器改装成磁流变减振器，搭建了磁流变悬架全车测控系统，运用设计的分级模糊控制器，进行了平顺性随机输入实车道路试验。试验结果表明对汽车磁流变悬架的垂直振动进行分级模糊控制是可行的，能有效提高汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性。

关键词：磁流变减振器 汽车 模糊控制 分级控制 道路试验

中图分类号：U463.33

0 前言

随着科技的发展和水平的提高，人们对汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性提出了更高的要求。传统汽车悬架是一种被动减振系统，不能适应行驶工况的变化和任意道路激励。半主动悬架只需要输入少量能量就可以调节悬架的阻尼，且减振效果较接近主动悬架，近年来受到了汽车界的广泛关注。磁流变减振器为半主动悬架的实现提供了一种新途径，它通过改变驱动电流大小来调节减振器中线圈产生的磁场强弱，从而调节阻尼力大小，与其他类型的可控减振器相比，具有响应速度快、功耗低和调节范围大等特点^[1]。因此磁流变半主动悬架具有短期产业化潜力和广阔应用前景。

目前，国外把磁流变悬架系统用于实车路试的还不多见，成熟用于商业化的产品还没有^[2,3]；国内的研究起步更晚，对磁流变悬架的振动控制研究大都停留在实验室仿真或台架试验阶段。汽车悬架振动系统是非常复杂的非线性时变系统，建立完整、正确的全车振动模型非常困难，故采用依赖于精确系统模型的经典控制方法不适宜。因此，对于采用独立悬架的汽车，可以考虑简化为 1/4 车模型并设计相应的智能控制器，然后把它用于全车四个悬架进行独立控制，并寻求一定的策略来协调各独立控制器。为了检验控制效果，给磁流变悬架的实用化

和商业化打下基础，还必须进行相应的道路试验。

1 磁流变减振器特性

磁流变减振器是汽车磁流变悬架的关键部件，是控制系统中的执行器，经理论推导和对自行研制的某微型汽车磁流变减振器在 MTS8701 上的试验测试，其阻尼力 F 与活塞运动速度 v 、励磁电流 I 的关系可以表述为^[4]

$$F_d = C_e v + F_{MR} \operatorname{sgn}(v) \quad (1)$$

$$F_{MR} = aI^2 + bI + c \quad (2)$$

式中 C_e ——粘滞阻尼系数

v ——活塞相对运动速度

F_{MR} ——库仑阻尼力

a, b, c ——常数， $a \neq 0$

可以认为磁流变减振器的阻尼力由粘滞阻尼力 $C_e v$ 和库仑阻尼力 F_{MR} 两部分组成。当减振器几何尺寸确定后，粘滞阻尼力只是活塞运动速度的函数，是不可控的。而库仑阻尼力只是励磁电流的函数，因此可以通过控制器调节减振器的输入电流大小，改变减振器阻尼力，实现汽车磁流变悬架系统半主动控制。

2 分级模糊控制器设计

2.1 混合阻尼控制策略

乘坐舒适性和操纵稳定性是汽车两大重要性能指标。经典的天棚阻尼控制策略以抑制簧载质量的振动、提高汽车乘坐舒适性为目的，理想的天棚阻

* 国家自然科学基金(50135030, 60404014)和重庆市院士基金(027754)资助项目。20040811 收到初稿，20050115 收到修改稿

尼力为^[5]

$$F_s = -c_s \dot{x}_s \quad (3)$$

式中 F_s ——天棚阻尼力
 \dot{x}_s ——簧载质量的垂直振动速度
 c_s ——天棚阻尼系数

但天棚阻尼是理想的模型，在磁流变悬架中采用等效的方法使 F_{MR} 在一定范围内实现天棚阻尼控制。

$$F_{MR} = \begin{cases} F_{max} & \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_i) > 0 & F_s > F_{max} \\ -c_s \dot{x}_s & \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_i) < 0 & F_s < -F_{max} \\ 0 & \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_i) < 0 & -F_{max} < F_s < F_{max} \end{cases} \quad (4)$$

式中 \dot{x}_i ——非簧载质量的垂直振动速度
 F_{max} ——磁流变减振器最大可调力值

地棚阻尼控制策略以抑制非簧载质量的振动，提高汽车操纵稳定性为目的，理想的地棚阻尼力为

$$F_g = -c_g \dot{x}_i \quad (5)$$

式中 F_g ——地棚阻尼力
 c_g ——地棚阻尼系数

但地棚阻尼也是一个理想的模型，可采用等效的方法使 F_{MR} 在一定范围内实现地棚阻尼控制。

$$F_{MR} = \begin{cases} F_{max} & \dot{x}_i(\dot{x}_s - \dot{x}_i) > 0 & F_g > F_{max} \\ -c_g \dot{x}_i & \dot{x}_i(\dot{x}_s - \dot{x}_i) < 0 & F_g < -F_{max} \\ 0 & \dot{x}_i(\dot{x}_s - \dot{x}_i) < 0 & -F_{max} < F_g < F_{max} \end{cases} \quad (6)$$

混合阻尼控制策略^[6]结合了天棚和地棚控制策略的优点，通过可调因子 a 来调节天棚阻尼力和地棚阻尼力的大小，获得混合阻尼力 F_h ，在提高汽车舒适性的同时兼顾操纵稳定性。

$$F_h = aF_s + (1-a)F_g \quad a \in [0,1] \quad (7)$$

2.2 模糊控制器

汽车悬架系统非常复杂，其振动具有非线性和时变性，采用经典控制方法或集中控制是非常困难的，且难以收到很好的效果。模糊控制是智能控制的一个分支，它非常适合于参数具有时变性、过程具有非线性、强耦合特点，且难以建立精确数学模型的控制场合。许多学者用它在汽车悬架振动控制中做了探索和研究。

对采用独立悬架的汽车的垂直振动进行控制，从简化和方便研究的角度来说，可用 2 自由度的 1/4 车磁流变半主动悬架模型，相应的模糊控制系统如图 1 所示。车身速度(v_s)和车轴速度(v_u)以及两者的相对速度($v_r = v_s - v_u$)经规一化处理后作为控制器输入，控制器输出为阻尼力 F 。

输入变量(v_s, v_u, v_r)相应的模糊子集分别为 A_i, B_j, C_k ($i, j, k=1\sim 5$)，相应的语言值为(负大 NB, 负小 NS, 零 ZE, 正小 PS, 正大 PB)，隶属函

数见图 2。

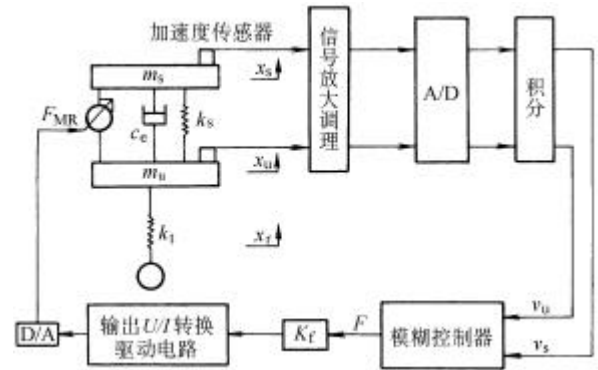


图 1 1/4 车磁流变悬架模糊控制系统

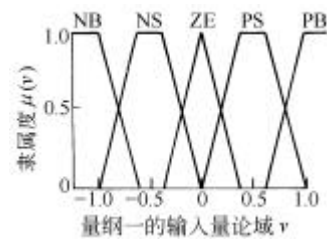


图 2 输入量的隶属函数

输出变量 F 相应的模糊子集为 O_l ($l=1\sim 7$)，相应的语言值为(负大 NB, 负中 NM, 负小 NS, 零 ZE, 正小 PS, 正中 PM, 正大 PB)，隶属函数见图 3。

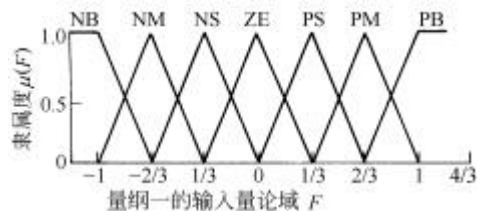


图 3 输出量的隶属函数

模糊控制规则由表 1 和表 2 两部分组成。表 1 体现了天棚阻尼控制的思想，通过降低车身振动，提高汽车平顺性；表 2 体现了地棚阻尼控制的思想，通过降低车轴振动来抑制车轮跳动，提高汽车操纵稳定性。

表 1 基于天棚控制思想的模糊控制规则

车身速度模糊状态	车身车轴相对速度模糊状态				
	NB	NS	ZE	PS	PB
	天棚阻尼控制力模糊状态				
NB	PB	PM	PS	ZE	ZE
NS	PM	PS	ZE	ZE	ZE
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	ZE	ZE	ZE	NS	NM
PB	ZE	ZE	NS	NM	NB

模糊推理采用 MAMDANI 推理法，根据表 1 的规则进行如下推理

表 2 基于地棚控制思想的模糊控制规则

车轴速度 模糊状态	车身车轴相对速度模糊状态				
	NB	NS	ZE	PS	PB
	地棚阻尼控制力模糊状态				
NB	ZE	ZE	PS	PM	PB
NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	NM	NS	ZE	ZE	ZE
PB	NB	NM	NS	ZE	ZE

$$R_n^1 = A_i \times O_l \text{ I } C_k \times O_l = R_{An}^1 \text{ I } R_{Cn}^1$$

$$i, k = 1, 2, L, 5 \quad l = 1, 2, L, 7$$

$$n = 1, 2, L, 25 \quad (8)$$

根据表 2 的规则进行如下推理

$$R_n^2 = B_j \times O_l \text{ I } C_k \times O_l = R_{Bn}^2 \text{ I } R_{Cn}^2 \quad j = 1, L, 5 \quad (9)$$

这样，如果已知输入(v_{s0}, v_{u0}, v_{r0})，由表 1 各条规则推理得到控制量为

$$O_{sn} = v_{s0} \text{ o } R_{An}^1 \text{ I } v_{r0} \text{ o } R_{Cn}^1 \quad (10)$$

$$O_s = \bigvee_{n=1}^{25} O_{sn} \quad (11)$$

由表 2 各条规则推理得到控制量为

$$O_{un} = v_{u0} \text{ o } R_{Bn}^2 \text{ I } v_{r0} \text{ o } R_{Cn}^2 \quad (12)$$

$$O_u = \bigvee_{n=1}^{25} O_{un} \quad (13)$$

非模糊化采用 Min-Max 重心法，根据对汽车乘坐舒适性和操纵稳定性关注程度的不同，用调节因子 a 将两个规则集确定的输出加权，得到控制器最后输出

$$F = K_f \frac{a \sum_{l=1}^7 m_{O_s}(O_s) O_l + (1-a) \sum_{l=1}^7 m_{O_u}(O_u) O_l}{a \sum_{l=1}^7 m_{O_s}(O_s) + (1-a) \sum_{l=1}^7 m_{O_u}(O_u)} \quad (14)$$

式中 K_f ——输出比例因子

利用式(2)对控制器输出 F 进行转换，可得驱动电流值。在 1/4 车磁流变悬架控制系统仿真平台上，对模糊智能控制作了计算机仿真计算，结果表明能够不同程度地提高汽车乘坐舒适性和轮胎接地性^[2]。

2.3 分级控制

对于采用独立悬架的汽车，可以把针对单只悬架设计的模糊智能控制器分别用于全车 4 只悬架，进行独立控制。实际上，汽车各悬架之间的输入和响应是有一定耦合的，为了减小因模型的简化和独立控制给整个控制系统带来的影响，有必要探讨一种分级递阶的智能控制来协调汽车 4 只悬架间的振动控制，见图 4。

运行控制级由 4 个局部模糊控制器组成，分别控制 4 只独立的磁流变悬架的振动。协调级由 1 个协调器构成，根据参数识别手段检测整车振动情况，对 4 个局部模糊控制器的输出进行在线调整，使四

只悬架上方簧载质量的垂直振动速度尽可能得到同时抑制，在改善整车平顺性的同时兼顾提高操纵稳定性，以适应实际行驶中汽车变化的工况。

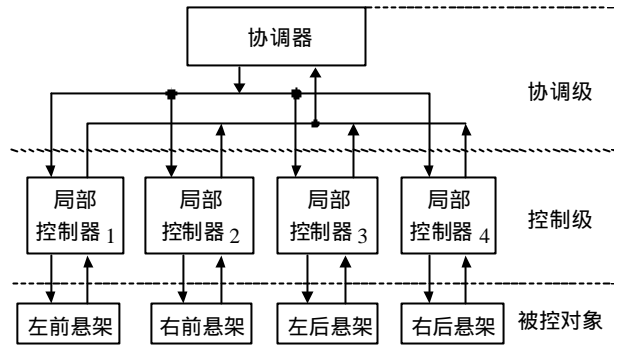


图 4 磁流变悬架振动分级控制系统结构

下面建立协调控制规则，先定义俯仰角加速度和侧倾角加速度：俯仰角加速度： $\mathcal{R} = (a_b - a_f) / S_1$ ， a_f 指车厢前部底板垂直振动加速度， a_b 指车厢后部底板垂直振动加速度， S_1 指前后轴距。

侧倾角加速度： $\mathcal{Q} = (a_l - a_r) / S_2$ ， a_l 指车厢左侧底板垂直振动加速度， a_r 指车厢右侧底板垂直振动加速度， S_2 指左右轮距。控制规则如下。

(1) 规则一

根据 $v_{si}(n)$ 和 $v_{ui}(n)$ ，在线调整混合控制可调因子 a 的大小。

(2) 规则二 ($a > 0$)

- 1) 如果 $|v_{si}(n)| > a * |v_{si}(n-1)|$ ，那么 $F_{si}(n) = F_{si}(n-1)$ 。
- 2) 如果 $|v_{si}(n)| > a * |v_{si}(n-1)|$ ，那么进入本地控制。

(3) 规则三 (k_i 为俯仰因子， l_i 为侧倾因子， $e > 0, h > 0$)

- 1) 如果 $\mathcal{R} > e$ ，那么 $F_i(n) = k_i F'_i(n)$ ， $k_1 = k_2 > 1, k_3 = k_4 = 1$ 。
- 2) 如果 $\mathcal{R} < -e$ ，那么 $F_i(n) = k_i F'_i(n)$ ， $k_1 = k_2 = 1, k_3 = k_4 > 1$ 。
- 3) 如果 $-e < \mathcal{R} < e$ ，那么 $F_i(n) = k_i F'_i(n)$ ， $k_i = 1$ 。
- 4) 如果 $\mathcal{Q} > h$ ，那么 $F_i(n) = l_i F'_i(n)$ ， $l_1 = l_3 = 1, l_2 = l_4 > 1$ 。
- 5) 如果 $\mathcal{Q} < -h$ ，那么 $F_i(n) = l_i F'_i(n)$ ， $l_1 = l_3 > 1, l_2 = l_4 = 1$ 。
- 6) 如果 $-h < \mathcal{Q} < h$ ，那么 $F_i(n) = l_i F'_i(n)$ ， $l_i = 1$ 。

上面规则中， $v_{si}(n)$ 表示第 n 次采集的第 i 只悬架上方簧载质量振动的速度， $v_{ui}(n)$ 表示第 n 次采集的第 i 只悬架下方非簧载质量振动的速度， $F'_i(n)$ 表

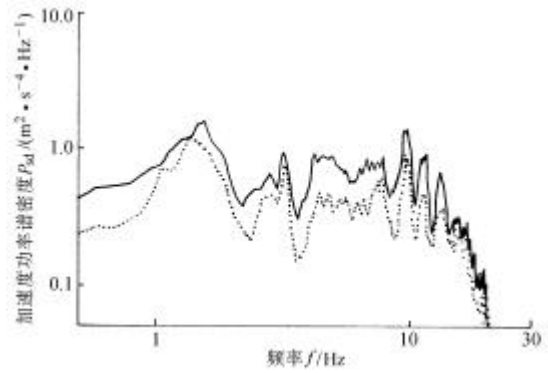
示第 i 个局部模糊控制器第 n 次的计算控制量， $F_i(n)$ 表示第 i 个局部模糊控制器第 n 次的最终控制量 ($i=1,2,3,4$)，当 $i=1,2,3,4$ 时，依次对应前左、前右、后左和后右这四只磁流变悬架。

3 道路试验

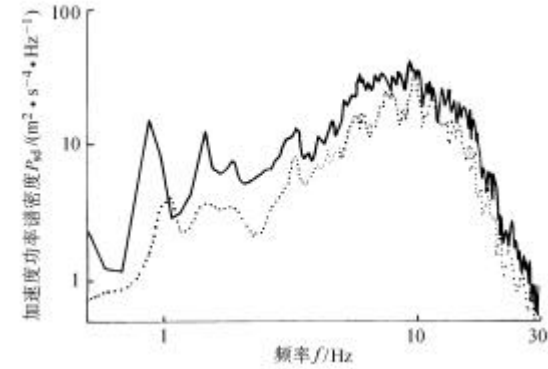
为测试磁流变半主动悬架系统的减振控制效果，设计了全车振动的分级模糊控制软件，用自行研制的 4 只磁流变减振器替换了原被动减振器，搭建了全车振动测控系统^[2]。用来测量车身振动的加速度传感器安装在悬架正上方车厢底板上，测量非簧载质量振动的加速度传感器安装在悬架下方车轴上。控制系统集成了 DSP 控制器、电流驱动器、信号调理模块、AD 和 DA 转换模块。测试和平顺性分析系统由平顺性座垫、加速度传感器、电荷放大器、数据采集箱和笔记本计算机及分析软件组成。

参照 GB/T4970-1996《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》，要求道路平直，纵坡不大于 1%，路面干燥，不平度应均匀无突变，长度不小于 3 km。在没有专用试车道路的情况下，选择接近 B 级路面的水泥路作为试验道路，以 40 km/h、60 km/h 两种行驶速度进行了汽车半载的平顺性随机输入试验。作为对比，该车在未改装减振器前也在相同条件下进行了测试。试验结果评价标准参照 ISO2631，取座椅处加速度的总加权方均根值、车厢底板及车轴上的加速度方均根值来评价。图 5 是由测试结果计算后得到的 60 km/h 加速度功率谱。

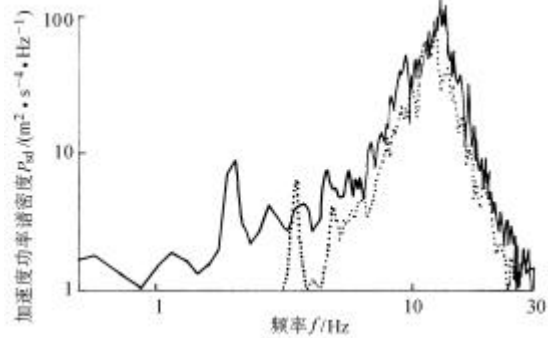
从图 5a、5b 可以看到，分级模糊控制有效地抑制了汽车簧载质量(车身)垂直振动加速度的一阶共振峰幅值，明显地降低了 4.0~12.5 Hz 频段范围内的加速度值，在高频段(13 Hz 以上)仍有一定效果。从图 5c、5d 可见，汽车非簧载质量(车轴)垂直振动加速度在一、二阶共振峰附近有较好的控制效果。由图 5e 可见，驾驶员座椅处的垂直振动加速度在一阶共振峰及附近有非常明显的控制效果，在人体



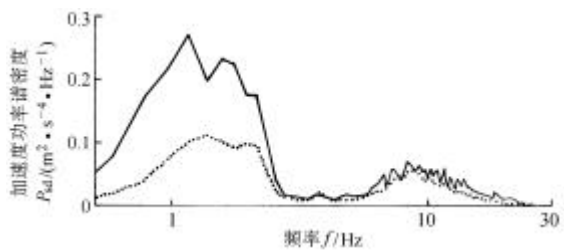
(b) 后悬架上方底板测试结果



(c) 前悬架下方车轴测试结果



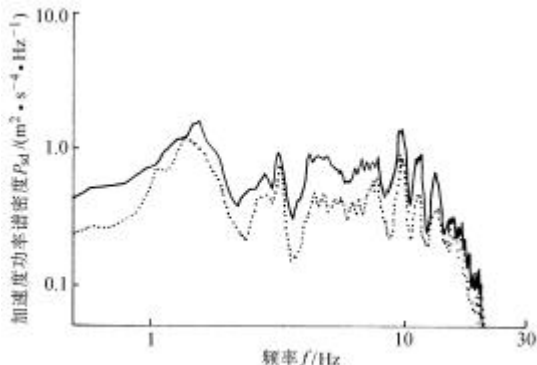
(d) 后悬架下方车轴测试结果



(e) 驾驶员座椅测试结果

图 5 加速度功率谱

— 被动 ····· 模糊控制



(a) 前悬架上方底板测试结果

4.0~12.5 Hz 敏感频段范围内有较好效果。

根据各测点计算得到的加速度方均根见表 3。从表 3 中可以看出，相对于同等条件下的被动悬架来说，采用分级模糊控制的 4 只磁流变悬架垂直振动的加速度方均根值都得到了有效抑制，且左右两侧悬架振动差异很小。

表3 汽车磁流变悬架分级模糊控制垂直加速度方均根值(0~30 Hz)

测点	车速 $v/(km \cdot h^{-1})$					
	40			60		
	加速度方均根		下降率	加速度方均根		下降率
	$a/(m \cdot s^{-2})$			$a/(m \cdot s^{-2})$		
被动悬架	磁流变悬架	$d/\%$	被动悬架	磁流变悬架	$d/\%$	
车 前左	0.455 7	0.350 4	23.1	0.547 6	0.444 1	18.9
厢 前右	0.448 6	0.348 6	22.3	0.551 0	0.442 5	19.7
底 后左	0.499 6	0.407 7	18.4	0.598 7	0.502 9	16.0
板 后右	0.501 3	0.408 6	18.5	0.603 1	0.513 2	14.9
车 前左	2.214 0	1.906 3	13.9	2.900 4	2.5930	10.6
车 前右	2.186 5	1.911 0	12.4	2.896 6	2.609 8	9.9
轴 后左	2.536 7	2.275 4	10.3	3.401 3	3.112 1	8.5
轴 后右	2.658 2	2.363 1	11.1	3.486 5	3.327 6	8.0
座椅(加权)	0.158 1	0.124 6	21.2	0.177 5	0.142 5	19.7

4 结论

(1) 相对于被动悬架,磁流变悬架明显地抑制了汽车垂直振动,这证明磁流变减振器是一种非常有应用前景的可控阻尼执行器。

(2) 混合阻尼控制策略与模糊智能控制策略相结合,设计的1/4车辆磁流变悬架系统控制器能够使汽车在获得良好舒适性的同时,提高轮胎接地性和操纵稳定性。

(3) 道路试验结果表明,把1/4车模型的振动控制策略用于全车四个磁流变悬架独立控制后,再加上全车振动协调处理来抑制汽车整车垂直振动是可行的,降低了模型的不确定性对控制系统的影响,且有较强的鲁棒性。

(4) 道路试验数据对指导磁流变减振器的设计和进一步优化整车悬架系统控制器都具有重要意义。

参考文献

- Choi S B, Lee H S, Hong S R, et al. Control and response characteristics of a magneto-rheological fluid damper for passenger vehicles. SPIE, 2000, 3 985 : 438 ~ 443
- 李锐. 汽车磁流变悬架振动控制算法与实车试验研究: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004
- <http://www.pcauto.com.cn/teach/qczs/10310/22603.html>
- 余森, 廖昌荣, 李立新, 等. 磁流变减振器控制研究. 化学物理学报, 2001, 14(5): 606 ~ 612
- Karnopp D. Active and semi-active vibration isolation. Transactions of ASME Journal of Special 50th Anniversary

Design Issue, 1995, 117 : 177 ~ 185

- Ahmadian M. A Hybrid semiactive control for secondary suspension applications. In : Proceedings of the Sixth ASME Symposium on Advanced Automotive Technologies, 1997 ASME International Congress and Exposition, Dallas, Texas, November 1997, 6 : 42 ~ 47

CONTROL OF AUTOMOTIVE SUSPENSIONS VIBRATION VIA MAGNETO RHEOLOGICAL DAMPER

Li Rui

(College of Automation, Chongqing University of Post and Telecom, Chongqing 400065)

Yu Miao Chen Weimin

Liao Changrong Dong Xiaomin

(College of Opto-Electric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract : Characteristics of magneto-rheological(MR) damper are analysed. A hierarchical fuzzy controller, composing of control and coordination level, is proposed for vibration control of automotive MR suspensions. In the control level, based on a hybrid control strategy of sky-hook control and ground-hook control, a semi-active fuzzy logic controller is designed for each support MR suspension system. In the coordination level, a coordination controller is designed to coordinate the four independent semi-active fuzzy controllers by adjusting their output parameters according to the system feedback. To validate the real results of hierarchical fuzzy control, a MR semi-active suspensions control and test system is set up and implemented on a mini vehicle, which is equipped with four controllable MR dampers. Test results show that the vertical vibration can be effectively reduced and the ride comfort, road holding and handling stability of automotive vehicle can be improved by the hierarchical fuzzy controller.

Key words : Magneto-rheological damper Automotive vehicle

Fuzzy control Hierarchical control Road test

作者简介: 李锐, 男, 1975年出生, 硕士。主要从事智能机械结构及系统的控制研究。

E-mail : lirui_cqu@163.com