DOI: 10.3901/JME.2017.06.110

液压互联 ISD 悬架系统模式切换研究*

汪若尘 叶青 孙泽宇 周卫琪 陈龙
(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 为实现液压互联 ISD 悬架全局工况最优, 提出一种基于模糊控制的液压互联 ISD 悬架系统模式切换控制策略。研究液压互联 ISD 悬架系统工作原理, 仿真对比液压互联 ISD 悬架两种工作模式力学特性, 确定模式切换参数, 并设计悬架工作模式识别以及模式切换控制策略, 针对液压互联 ISD 悬架工作模式构建液压互联 ISD 悬架模糊控制器, 并进行整车仿真分析, 仿真结果与预期基本一致。在此基础上设计液压互联 ISD 悬架样机, 进行台架试验, 验证了所提出的液压互联 ISD 悬架系统模型的正确性以及模糊切换控制方法的有效性。

关键词: 液压互联; ISD 悬架系统; 模糊切换控制; 模式识别; 实车试验

中图分类号: U463

Study of Mode Switch of the Hydraulically Interconnected Inerter-spring-damper Suspension System

WANG Ruochen YE Qing SUN Zeyu ZHOU Weiqi CHEN Long
(Institute of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Jiangsu 212013)

Abstract: A strategy of model switch based on fuzzy control is proposed in order to meet the optimal performance of hydraulically interconnected inerter-spring-damper suspension (HIISDS), which during the global operating condition. The working principal of HIISDS has been briefly introduced at first, two different road excitations are used to validate the adaption of the two suspension modes, a parameter of mode switch is then derived through the simulation results. Second, mode switch strategy as well as mode recognition of suspension working modes are designed, the fuzzy controller which based on the mode switch has also been developed, and the result of simulation is basically consistent with expectations. Finally, a HIISDS suspension prototype is designed based on simulation results, and test results reconfirm that the fuzzy control of mode switch of HIISDS modes effectively.

Key words: hydraulically interconnected; inerter-spring-damper suspension system; fuzzy switching control; mode recognition; real vehicle test

0 前言

传统悬架由于其可靠性和有效性得到了大规模的推广应用。但是其固有缺陷使得悬架整体性能提升受到限制^[1-4]。因此, 如何突破传统悬架性能制约, 进一步提升悬架性能得到了国内外学者的广泛关注。

SMITH 等^[5]提出了“惯容器”概念, 研究了惯容器防共振特性, 并将惯容器引入悬架系统, 通过仿真验证了 ISD 悬架在提高行驶平顺性方面的有效

性; PAPAGEORIOU^[6]进行了机械式惯容器性能试验, 指出了惯容器背隙问题及其影响; WANG 等^[7-8]试制了 ISD 悬架, 将其应用在铁路机车底盘上, 试验结果显示 ISD 悬架能有效提高车辆行驶平顺性; 张孝良等^[9-11]基于天棚阻尼被动实现设计了两级减振式 ISD 悬架结构, 并通过台架试验验证了理论模型的正确性。

此外, 部分学者对互联悬架展开了研究。HAWLEY^[12]首次提出了互联悬架体系, 并阐述了悬架之间多种互联方式, 确定了互联悬架基于不同互联结构具有防止车身俯仰及侧倾的特点; ORTIZ^[13]提出了基于四轮组机械液压组合系统的互联悬架系统, 并进行了理论及试验研究; ZHU 等^[14-18]设计了一种主动液压互联悬架系统, 并研究了不同控制策

* 国家自然科学基金(51575240)、江苏省自然科学基金(15KJA460005)和镇江市重点研发(GY2015029)资助项目。20160304 收到初稿, 20160919 收到修改稿

略下主动互联悬架对车辆动态性能的影响。

上述研究表明,国内外学者对 ISD 悬架和互联悬架研究已经较为深入,但尚未对两者进行综合研究。

现提出了一种综合液压互联悬架和液压 ISD 悬架的液压互联 ISD 悬架系统方案,分别构建了所设计悬架两种工作模式整车模型,对比分析了两种工作模式适应工况,在此基础上提出了一种模式切换思想,制定了模式间切换控制策略,设计了原理样机,进行了台架试验。该悬架通过模式切换在兼顾行驶平顺性和操纵稳定性的同时满足不同道路悬架性能偏向,实现全局工况综合性能最优。

1 液压互联 ISD 悬架

液压互联 ISD 悬架是由两种悬架模式一体式设计的复杂机械系统,其结构如图 1 所示,由双作用式液压缸,液压马达,一二级减振器,互联管路、电磁阀以及控制器组成,包括液压互联悬架工作模式和液压 ISD 悬架工作模式,其结构通过模式切换实现不同道路上综合性能最优,其中 A、B、C、D 为电磁阀,A、D 开启且 B、C 关闭,则系统处于 ISD 悬架模式,A、D 关闭且 B、C 开启,则系统处于互联悬架模式。

图 1 液压互联 ISD 悬架结构原理图

1.1 直线工况模式

汽车在平顺路面行驶时,路面不平度低于静扰度,四轮过约束程度不明显,路面对悬架产生的冲击载荷和扭转载荷较小,为了满足人们对乘坐舒适性和行驶平顺性的要求,降低车身振动,设计悬架时通常在保证一定操纵稳定性的情况下优先提高行驶平顺性。在此基础上进行液压互联 ISD 悬架系统工作模式判定,在 Matlab/Simulink 环境中,建立液

压互联 ISD 悬架系统两种工作模式整车模型,对比仿真以确定设计悬架在直线工况的工作模式。

设定车辆以 22 km/h 匀速通过波长为 3 m 的对扭路面,设定振幅为 50 mm,在此工况下对车身侧倾角、左前车身垂直加速度进行仿真分析,系统时域响应如图 2 所示。

图 2 直线工况仿真对比

由图 2 可以看出,装有液压互联 ISD 悬架的车辆在对扭路面工况下综合性能明显优于传统悬架,此外,设计悬架在互联悬架工作模式下侧倾角明显小于 ISD 悬架工作模式,这是互联悬架特性决定的,与理论一致。但是综合性能 ISD 悬架工作模式明显优于互联悬架工作模式,综合考虑设计悬架在直线工况采用 ISD 悬架工作模式。

1.2 转向工况模式

当汽车在转向工况行驶时,左右轮胎载荷的显著差异会降低驱动力、制动力与对车身侧倾的抵抗力^[9-11],在针对转向路况设计悬架时优先考虑操纵稳定性。在此基础上对所设计悬架两种工作模式对比仿真,以确定转向工况采用的悬架工作模式。

设定车辆以 72 km/h 速度在 B 级路面行驶时,前轮加以 0.15 rad 转角输入,在此工况下对设计悬架两种悬架工作模式进行仿真分析,时域响应如图 3 所示,其方均根值如表 1 所示。

图3 转向工况仿真对比

表1 0.15rad 转角输入均方根值

悬架性能	ISD 悬架	互联悬架	降幅(%)
质心垂直加速度/(m/s ²)	0.217 8	0.228 3	-4.8
侧倾角/rad	0.284 8	0.249 0	12.57

有图2和表1可以看出,设计悬架在转向工况下互联悬架综合性能较优,侧倾角相对ISD悬架工作模式下下降了12.57%。综合考虑仿真结果以及车辆在转向工况对操纵稳定性偏向需求,确定设计悬架在转向工况采用互联悬架工作模式,设计切换参数为转向角。

2 模式切换控制系统设计

2.1 模式切换参数确定

基于液压互联ISD悬架系统两种悬架工作模式适应工况判定,确定切换参数阈值为转向角,分别以0.01 rad、0.02 rad、0.03 rad、0.04 rad、0.05 rad、0.10 rad、0.15 rad和0.20 rad转角输入,以设计悬架两种工作模式质心垂直加速度对比降幅作为行驶平顺性参考依据,以侧倾角对比降幅作为操纵稳定性参考依据进行仿真计算,其结果如图4所示。

由图4可以看出,液压互联ISD悬架系统两种悬架工作模式切换参数转向角的临界值为0.04 rad。

图4 模式切换参数阈值

2.2 模式切换策略

采用逻辑判断方法进行控制模式切换策略的设计,通过判断转向角的变化来决定设计悬架应在哪种工作模式,具体的液压互联ISD悬架系统多模式切换控制策略如图5所示。

图5 模式切换控制策略

2.3 模糊控制器设计

为了增强悬架系统的鲁棒性,采用模糊控制^[12-17]对悬架系统中电磁阀开闭进行控制从而实现悬架的模式切换,以使设计悬架性能进一步完善。

选取液压互联ISD悬架的转向角输入信号 e 以及转向角输入变化率 e_c 作为模糊控制器输入信号,输出信号为电磁阀的开闭。将输入的误差 (e) 和误差微分 (e_c) 分为5个模糊集:NB(负大),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PB(正大)。将输出 u 分为2个模糊集:0(关联ISD模式的电磁阀开,关联互联悬架模式的电磁阀闭),1(关联ISD模式的电磁阀闭,关联互联悬架模式的电磁阀开),为避免出现失控现象,本控制器转向角信号 e 论域设为 $\{-0.4, 0.4\}$,转向角变化率 e_c 的论域设为 $\{-0.4, 0.4\}$,节流阀开度的论域设为 $\{0, 1\}$ 。对于输入量误差 (e) ,误差微分 (e_c) 都采用高斯型的隶属函数(gaussmf),对于输出量 u 采用三角形隶属函数(trimf)。其模糊规则控制表如表2所示。

表 2 模糊控制策略规则

EC	E				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	1	1	1	1	1
NS	1	0	0	0	1
ZO	1	0	0	0	1
PS	1	0	0	0	1
PB	1	1	1	1	1

3 仿真结果分析

采用模糊切换方法对液压互联 ISD 悬架系统进行模式切换仿真分析，与直接采用开关控制的设计悬架进行对比仿真。设计路面工况：车辆以 20 m/s 速度行驶在 B 级路面，直线行驶 10 s，突然对方向盘加入 0.2 rad 转角输入，在此工况下，以质心垂直加速度和侧倾角加速度进行仿真计算，其仿真结果如图 6 所示。

图 6 模式切换对比仿真

由仿真结果可知，图 6 中直接采用逻辑开关进行模式切换精度不是特别理想，明显存在剧烈振荡，而该振荡现象通过模糊控制得到明显的缓解，切换过程相对稳定。此外，由于设计悬架结构特点，除模式切换过程外，两种悬架工作模式无相互干扰，两种切换控制下仿真曲线相同。

4 台架试验

为了验证液压互联 ISD 悬架工作模式切换的可行性，研制了液压互联 ISD 原理样机，并安装在试验车上，在 MTS320 四通道轮胎耦合道路模拟机上对设计样车进行了两种工作模式对比试验以及模式切换试验。其试验车辆和试验设备如图 7 所示。

图 7 实车试验

4.1 对扭路面试验

在 MTS 道路模拟机上，安装液压互联 ISD 悬架的模拟车辆以 32 m/s 车速行驶在幅值为 0.05 m，周期长为 3 m 的对扭路面，系统时域响应试验结果如图 8 所示。

图 8 对扭路面时域响应图

由图 8 可知，装有液压互联 ISD 悬架的模拟车辆在扭路上综合性能对比传统悬架有明显的提升。设计悬架在 ISD 悬架模式时，左前车身加速度相对互联悬架降幅明显，但是互联悬架模式防侧倾

明显。装有液压互联 ISD 悬架的模拟车辆在对扭路面上综合性能对比传统悬架有明显的提升。

4.2 系统频响特性试验

在 MTS 道路模拟机上载入某汽车试验场的砂石路面谱,对安装液压互联 ISD 悬架的模拟车辆进行随机激励模拟试验,时域响应如图 9 所示,输出方均根值如表 2 所示。

图 9 随机路面时域响应图

表 3 随机响应输出方均根值

方均根值	传统悬架	液压互联 ISD 悬架	
		ISD 悬架	互联悬架模式
侧倾角/rad	1.029 3	0.922 3	0.857 8
左前车身加速度/(m/s ²)	0.949 8	0.791 3	0.849 7

由图 9 和表 3 可以看出,在直线工况下,装有液压互联 ISD 悬架的模拟车辆通过某砂石路面时,综合性能对比传统悬架有显著的提升。由表 1 可以看出,在直线工况下,设计悬架在 ISD 悬架模式下工作时,相对互联悬架模式,操纵稳定性下降不多,而形式平顺性提升显著。

4.3 模式切换试验

基于试验条件限制,为了验证设计悬架模式切换的可行性,在 MTS 道路模拟机上进行近似模拟试验:在 MTS 道路模拟机换和 DSpace 上分别载入某汽车试验场的砂石路面谱和模糊切换控制模型,

并在试验过程中人为通过计算机对 DSpace 输入模拟转向信号,DSpace 基于输入信号判定对电磁阀进行通断控制从而实现两种悬架工作模式的切换,设计输入时间为试验第 25 s,其时域响应如图 10 所示。

图 10 模式切换响应图

由图 10 可以看出,在模式切换过程中,质心垂直加速度以及侧倾角加速度波动相对很大,这是外部路面以及系统内部液压干扰导致的。此外,直接开关控制的模式切换系统振荡幅度相对较大,控制效果不理想,在动态模式切换时将会恶化设计车辆的行驶平顺性和操纵稳定性,而采用模糊算法对设计悬架进行切换时控制效果相对理想。

5 结论

(1) 提出一种模糊切换策略,基于液压互联 ISD 悬架系统特性,依据不同路面对悬架的不同性能偏向需求进行模式切换,从而实现设计悬架全局工况综合性能最优。

(2) 试验结果对比分析所设计悬架两种工作模式,并进行了直线工况下的模式切换验证试验,部分验证了模式切换仿真的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 冯渊. 汽车电子控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,

- 2005.
- FENG Yuan. Automotive electronic control technology[M]. Beijing: China Machin Press, 2005.
- [2] SHIRAHATT A, PRASAD P S S, PANZADE P, et al. Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2008, 30(1): 66-76.
- [3] NAUDE A F, SNYMAN J A. Optimization of road vehicle passive suspension systems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2003, 27(4): 249-261.
- [4] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- YU Fan, LING Yi. Vehicle system dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [5] SMITH M C, WANG F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(4): 235-257.
- [6] PAPAGEORGIOU C. Laboratory experimental testing of inerters[C]// SMITH M C//Proceedings of 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005, 3351-3356.
- [7] WANG F C, LIAO M K, LIAO B H, et al. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks employing inerters[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(7): 805-830.
- [8] WANG F C, SU W J. Impact of inerter nonlinearities on vehicle suspension control[J]. Vehicle System Dynamic, 2008, 46(7): 575-595.
- [9] 张孝良. 理想天棚阻尼的被动实现及其在车辆悬架中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- ZHANG Xiaoliang. Ideal skyhook passive realization of its application in vehicle suspension[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012.
- [10] 陈龙, 张孝良, 聂佳梅, 等. 基于半车模型的两级串联型 ISD 悬架性能分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 102-108.
- CHEN Long, ZHANG Xiaoliang, NIE Jiamei, et al. Performance analysis of two-stage series-connected inerter-spring-damper suspension based on half-car model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 102-108.
- [11] 汪若尘, 黄欢, 孟祥鹏, 等. 基于虚拟样机模型的液压 ISD 悬架动态性能分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 137-142.
- WANG Ruochen, HUANG Huan, MENG Xiangpeng, et al. Dynamic performance analysis of hydraulic ISD suspension based on virtual prototype model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 137-142.
- [12] HAWLEY J B. Shock absorber and the like for vehicles: US 1647518[P]. 1927-11-01.
- [13] ORTIZ M. Principle of interconnected suspensions part 2: Methods of non-rigid interconnection & their effects[J]. Race Car Eng., 1997, 7(8): 76-81.
- [14] ZHU S Z. Development and implementation of fuzzy, fuzzy PID and LQR controllers for an roll-plane active hydraulically interconnected suspension[C]//Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Beijing, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014, 2017-2024.
- [15] LAM Q. Experimental Implementation of a fuzzy controller for an active hydraulically interconnected suspension on a sport utility vehicle[C]// Proceedings of the 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Gold Coast: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013, 383-390.
- [16] SHAO X X. Fuzzy control of hydraulically interconnected suspension with configuration Switching[C]. //Proceedings of the 2013 IEEE Vehicular Electronics and Safety, Dongguan: Institute of Electrical and Electronics Engineers 2013, 66-71.
- [17] ZHAO J. Vibration of Hydraulically Interconnected suspensions due to fluid-structure interaction[C]// Proceedings of the 13th Asia Pacific Vibration Conference, New Zealand: University of Canterbury, 2009, 22-25.
- [18] 丁飞, 张农, 韩旭. 安装液压互联悬架货车的机械液压多体系统建模及模态分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 116-123.
- DING Fei, ZHANG Nong, HAN Xu. Modeling and modal analysis of multi-body truck system fitted with hydraulically interconnected suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 116-123.

作者简介: 汪若尘, 男, 1978 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动态性能模拟与控制, 智能车辆系统, 新能源汽车。

E-mail: wrc@ujs.edu.cn

叶青(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士。主要研究方向为车辆动态性能模拟与控制。

E-mail: 601532371@qq.com