

## 【综述与评论】

## 装甲车半主动悬架系统的研究进展\*

谭伯政, 李以农, 郑玲

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**总结了车辆半主动悬架系统的发展状况,论述了可调减振器的研发动态,详细阐述了当前主要的半主动控制策略,指出应当着重研究复合控制方法以解决非线性性和时滞问题,并提出了装甲车辆半主动悬架系统今后的研究和发展方向。

**关键词:**装甲车;半主动悬架;控制策略

**中图分类号:**U463.33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2008)04-0066-03

悬架作为装甲车辆的重要部件,对装甲车的平顺性、操纵稳定性和通过性都有巨大的影响。传统被动悬架系统经过长时间的发展,结构上不断更新和完善,并且性能得到很大提高,但由于弹簧刚度和减振器阻尼系数等基本参数都固定不变,被动悬挂只能保证在设计条件下的减振效果,不能根据车辆的运行状态和路面状况进行实时调节,达到最优的减振效果,这就大大限制了车辆在各种复杂路况下的越野能力、战场机动性及火力精确性<sup>[1]</sup>。主动悬架是一种具有做功能力的悬架,在提高系统性能上具有较大潜力<sup>[2]</sup>。主动悬架系统耗能高,控制系统复杂,系统可靠性较差,这些因素均成为主动悬挂系统应用的技术瓶颈,因此,主动悬架技术在装甲车辆底盘上的应用时机尚不成熟。半主动悬架系统通过改变弹簧刚度或阻尼系数,来达到对悬架系统性能进行调整的目的,结构简单,系统可靠性高,能耗小,同时具有主动悬架、被动悬架的特征,在大多数情况下具有与主动悬架相近的特性<sup>[3-4]</sup>,是装甲车理想的悬架系统。悬架系统分类见表1。

## 1 半主动悬架系统的发展概况与现状

### 1.1 发展概况

半主动悬架的概念首先由 Crosby 和 Karnopp 于 1973 年提出<sup>[5]</sup>,20 世纪 80 年代初期才有试验性产品问世,它对车辆性能的改善十分有限。1975 年, Margolis 等人提出了“开关”控制的半主动悬架,它能产生较大的阻尼力。1983 年日本丰田汽车公司开发了具有 3 种减振工况的“开关”式半主动悬架。1986 年, Kim Brough 引入了 Lyapunov 控制方法,改

进了控制方法的稳定性。1988 年日本日产公司研制了“声纳”式半主动悬架,它通过声纳装置预测路面信息。悬架减振器有“柔和”、“适中”和“稳定”3 种状态。1994 年 prinkos 等人使用了电流变和磁流变体作为工作介质,研究了新型半主动悬架系统。20 世纪 90 年代,军用轮式车辆半主动悬架系统的研究也取得了突破。美国陆军坦克车辆装备司令部在 1997 年前后将液压可调减振器构成的半主动悬挂系统安装在布莱德利步兵战车上进行了场地试验,结果表明车辆的机动性能得到了大幅度的提高。2003 年前后美军又在重型“悍马”吉普车上安装了基于磁流变减振器的半主动悬挂系统,取得了越野速度提高 30%~40% 的良好试验效果。

### 1.2 刚度可调半主动悬架系统

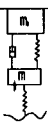
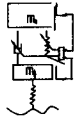
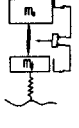
弹性元件刚度可调是在空气弹簧(油气弹簧)基础上实现的。通过改变弹簧刚度来减振的半主动悬挂由 Hubbard 和 Margolia 于 1976 年提出<sup>[6]</sup>。20 世纪 80 年代油气悬架已广泛用于装甲车上,我国通过努力也在履带式装甲车上成功应用油气悬架,为实现装甲车悬架弹簧刚度控制奠定了基础。

车辆弹性元件需承担车身的静载,因而实施刚度控制比阻尼控制困难得多,目前主要对半主动悬架阻尼控制比较多。但空气悬架(油气悬架)具有刚度低、质量轻、噪声低、寿命长等独特优势,因此,许多学者开展了基于空气弹簧(油气弹簧)的半主动悬架的研究,可以预见,空气悬架(油气悬架)在装甲车半主动悬架系统的发展过程中将起到举足轻重的作用。

\* 收稿日期:2008-04-01

作者简介:谭伯政(1980—),男,硕士研究生,工程师,主要从事车辆磁流变智能悬架系统控制研究;李以农(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事汽车系统动力学控制、汽车主动安全性、振动控制等研究。

表1 悬架系统分类

悬架系统	系统模型	操作频带	所需最大能量	和被动悬架相比性能的提高	
				舒适性	安全性
被动		—	—	—	—
半主动		$f_B - f_w$	50 W	20% ~ 25%	10% ~ 25%
主动		$0 \sim f_w$	1.5 ~ 1.7 kW	> 30%	25%

注:  $f_B$  为簧上质量的固有振动;  $f_w$  为簧下质量的固有振动频率

### 1.3 阻尼实时可调半主动悬架系统

1.3.1 节流孔可调悬架. 节流孔可调悬架是早期半主动悬架研究的主要方向, 通过步进电机或电磁阀来控制节流阀的流通面积连续调节阻尼<sup>[7]</sup>. 可调节流阀一般设置在减振器内部, 也可以设置在外部的旁通道上, 如梅赛德斯-奔驰公司曾研制出一种外置可调减振器. 经过长时间的研究发现, 节流孔可调减振器有先天的缺陷, 如响应速度慢、块速调节节流孔容易引起流量的严重脉动, 影响振动控制效果<sup>[8]</sup>.

1.3.2 电流变和磁流变减振器. 20世纪90年代, 电流变和磁流变等新型材料的相继出现. 利用电流变和磁流变液研制的减振器可以实现无级可调, 磁流变液(电流变液)在外加磁场(电场)作用下, 其黏度、剪切强度等发生显著变化. 电流变液对电场反应迅速, 控制带宽广<sup>[9]</sup>. 磁流变液响应略慢, 但在屈服应力、温度范围、塑形黏度、稳定性等方面强于电流变液<sup>[10]</sup>, 并且在同样的减振要求下, 磁流变液减振器的耗电量明显低于电流变液减振器. 因而, 各国军用车辆也加大了在这方面的研究. 美国内华达大学为“悍马”军用吉普车设计并制造了磁流变减振器, 该磁流变减振器具有失效保护功能, 试验表明, 磁流变减振器输出阻尼力大, 响应速度快, 具有优良的动态特性. 国内在磁流变减振器的研究上做了大量工作, 取得了一些成绩. 国家仪表功能材料工程研究中心研制的磁流变体, 其剪切屈服应力基本达到美国 Lord 公司的水平<sup>[11]</sup>.

## 2 半主动悬架系统的主要控制策略

目前, 应用于悬架控制系统的控制理论比较多, 主要有天棚控制、最优控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、神经网络控制及复合控制等.

1974年美国学者 Karnopp 等提出了天棚阻尼控制思想. 原理是在车身上安装一个与车身振动速度成正比的阻尼器, 可以完全防止车身与悬架系统产生共振, 达到衰减

振动的目的. 在天棚控制方式中, 控制力取决于车体的绝对速度的反馈, 不需要很多传感器也不需要复杂的数学模型, 可靠性较好. 控制力可以表示为:

$$f = -C_{sky}\dot{x}$$

式中:  $C_{sky}$  为比例系数;  $x$  为车体垂直振动速度.

天棚阻尼是理论上的理想状态, 为实现“天棚”控制思想提出了“on-off”控制策略, 根据控制信号调节阻尼器阻尼的“软”、“硬”设置, 进而调整阻尼力的大小, “on-off”阻尼控制思想的阻尼力算法可用如下公式表示:

$$F_d = \begin{cases} c(\dot{x} - \dot{y}) & \dot{x}(\dot{x} - \dot{y}) > 0 \\ 0 & \dot{x}(\dot{x} - \dot{y}) < 0 \end{cases}$$

由于天棚阻尼控制简单可靠, 所以成为军用车辆重点研究对象. 目前, 研究的重点是改进型的天棚阻尼控制方法<sup>[12]</sup>, 综合天棚和地棚阻尼控制的优点而产生的混合控制算法<sup>[13]</sup>. 最优控制是比较成熟和完整的半主动悬架控制理论, 在车辆上运用的最优控制方法常用的有线性最优控制、 $H_\infty$  最优控制等. 线性最优控制是将 LQ (Linear Quadratic) 应用于车辆悬架系统中, 采用线性最优控制算法设计主动最优控制力为:

$$u(t) = -GX(t)$$

在最优控制领域, 装甲兵工程学院关于履带车辆悬架系统半主动控制策略的研究比较深入.

自适应控制通过自动检测悬架系统的参数变化来调整控制策略, 保持其性能最优. 应用于车辆悬架系统自适应控制方法主要有模型参考自适应控制和自校正控制两类<sup>[14]</sup>, 自适应控制能显著改善汽车的行驶特性<sup>[15]</sup>, 但是, 自校正控制过程需要在线辨识大量的结构参数, 实时性不好; 而模型参考自适应控制方法涉及路面信息获得的精度问题.

模糊控制及神经网络控制是解决具有非线性、时变和不确定因素系统的有效方法. 模糊控制技术可以使系统的鲁棒性更好, 减少控制器的存储空间; 神经网络控制具有自学能力和大规模并行处理的能力, 在车辆悬架系统减振

控制中有着广泛的前景<sup>[16]</sup>。但是,模糊控制和神经网络控制是建立在专家知识和经验的基础上的,因此人为因素在其中占据着很重要的角色,如果专家知识的集合不能真实或准确地反应车辆的状态,那么控制就失去了准确性。

目前,应用于车辆悬架振动控制的各种控制策略都有自身无法弥补的缺陷,难以达到人们期望的效果。而将两种或多种控制策略相结合,对悬架进行复合控制往往能得到意想不到的结果。近期文献记载的控制策略设计有应用于装甲车辆的自适应控制与LQG控制的联合控制,最优预见控制与神经网络控制的复合,以及模糊控制与神经网络控制的复合等等。研究表明,复合控制方法更适用于车辆悬架这样复杂非线性系统的建模与控制,可以预见复合控制方法是今后控制策略研究的一个重要方向。

### 3 今后研究和开发工作的方向

#### 3.1 研究开发可靠、高效的减振器

变刚度油气弹簧仍然有较高的研究价值,特别是在在现有装甲车辆的改进上。磁流变减振器的发展已成为车辆行业发展的焦点,虽然国外的研究成果及应用已经比较多,但国内还处于理论研究和试验阶段,主要是磁流变液减振器的工作不稳定,成本偏高。因此,当前的工作重点应该包括2方面:①研制高性能磁流变材料;②优化磁路及减振器结构。

#### 3.2 研究开发稳定、智能的控制方法

为了满足要求,要充分运用智能控制技术、非线性控制理论及动力学系统理论<sup>[20]</sup>,综合应用各种理论技术开发稳定、智能的复合控制方法。由于车辆悬架系统属于强非线性和强耦合系统,用线性系统模型对悬架系统求解会带来误差,另外,任何系统总存在不可避免的时滞<sup>[21]</sup>。这方面的研究者提出了多种解决办法,其中一种是采用模糊控制、神经网络控制、鲁棒控制和智能学习系统等智能控制,它们将是今后应用控制领域的一个主要研究方向。

#### 3.3 轻型轮式装甲车将是半主动悬架的重要应用领域

目前,半主动悬架技术主要应用于高级轿车,而对该技术需求更为迫切的是轻型轮式装甲车领域。随着装甲车辆装备信息化建设的逐渐深入,轻型轮式装甲车也逐渐形成了自身鲜明的发展方向,高机动性就是其发展特色之一,主要表现在车辆的快速反应能力、行驶的地域更加广泛,通过崎岖、苛刻路面的能力增强,这就要求车辆的行驶平顺性与之相适应。任何技术从出现到实际应用都有一个漫长的过程,半主动悬架技术在国内已经有着广泛的研究基础,今后的研究工作应以轻型轮式装甲车的悬架系统为切入点,将该领域的技术逐渐推广。

#### 参考文献:

- [1] 王德胜,杨建华.装甲车辆行驶原理[M].北京:装甲兵工程学院出版社,1992.
- [2] Lauwerys C, Swevers J, Sas P. Model Free Control Design for a Semi-active Suspension of a Passenger Car[C]. Proceedings of ISMA, 2004:75-86.
- [3] Margolis D L. The Response of Active and Semi-active Suspension to Realistic Feedback Signals[J]. Vehicle System Dynamics, 1982(11):267-282.
- [4] 王世明,王孙安.半主动悬架及其控制[J].汽车技术, 1999(12):1-3.
- [5] Grosby M J, Karnopp D C. The Active Damper-A New Concept for Shock and Vibration Control[J]. The Shock and Vibration Bull, 1973,43(4):119-133.
- [6] Hrovat D. Survey of Advanced Suspension Developments and Related Optimal Control Applications[J]. Automatica, 1997,33(10):56-58.
- [7] Reimpell J, Stoll H. The Automotive Chassis[M]. Arnold: [s. n], 1996.
- [8] 胡海岩,郭大蕾,温建生.振动半主动控制技术的进展[J].振动、测试与诊断,2001,21(4):235-244.
- [9] Choi S B, Lee H K, Chang E G. Field Test Results of a Semi-active ER Suspension System Associated with Skyhook Controller[J]. Mechatronics, 2001(11):345-353.
- [10] Yokoyama M, Hedrick J K, Toyama S. A Model Following Sliding Mode Controller for Semi-active Suspension Systems with MR Dampers [C]//Proceedings of the American Control Conference Arlington. VA:[s. n], 2001.
- [11] 刘奇,张平,王东亚,等.磁流变体(MRF)材料的制备与性能研究[J].功能材料,2001,32(3):257-259.
- [12] Riccardo Caponetto, Olga Diamante, Giovanna Fargione, et al. A soft Computing Approach to Fuzzy Sky-Hook Control [J]. Vehicle Systems Technology, 2003,11(6):786-797.
- [13] Fernando D, Goncalves, Mehdi Ahmadian. A Hybrid Control Policy for Semi-active Vehicle Suspensions [J]. Shock and Vibration, 2003(10):59-69.
- [14] 郑玲,邓兆祥,李以农.汽车半主动悬架的滑模变结构控制[J].振动工程学报,2003,16(4):457-462.
- [15] 喻凡,郭孔辉.自适应悬架对车辆性能改进的潜力[J].中国机械工程,1998,9(6):67-69.
- [16] 丁科,侯朝帧,罗莉.车辆主动悬架的神经网络模糊控制[J].汽车工程,2001,23(5):240-343.
- [17] Gao Huijun, Lam James, Wang Changhong. Multi-objective Control of Vehicle Active Suspension Systems Via Load-dependent Controllers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006,290:654-675.
- [18] 李以农,郑玲.基于微分几何理论的汽车半主动悬架半主动控制[J].中国公路学报,2005,18(1):109-111.
- [19] 姜立标,王薇,谢东,等.汽车半主动空气悬架自适应控制和神经网络控制[J].哈尔滨工业大学学报, 2005,37(5):1746-1750.
- [20] 胡海岩,孟庆国,张伟,等.动力学、振动与控制学科未来的发展趋势[J].力学进展,2002(2):294-296.
- [21] 张文丰,翁建生,胡海岩.时滞对车辆悬架“天棚”阻尼控制的影响[J].振动工程学报,1999,12(4):486-491.