

车辆主动悬架系统及其控制方法^{*}

刘少军, 饶大可, 黄中华

(中南大学 湖南 长沙 410083)

[摘要] 主动悬架系统能使汽车乘坐舒适性和操作安全性同时得到改善,是当前汽车业的一个热点研究课题,也是主动隔振研究中的一个典型对象. 介绍和比较了当前国外两种不同类型的液压主动悬架系统,介绍和评价了天棚阻尼器控制、最优控制、 H_{∞} 控制、预见控制、模糊控制,等主动悬架系统上常用和有发展前途的控制方法和特点.

关键词: 主动振动控制; 主动悬架; 控制方法; 汽车

中图分类号: U 463

文献标识码: A

文章编号: 1000-590X(2003)02-0065-05

Active Suspension System and Its Control Method for Vehicles

LIU Shao-jun, RAO Da-ke, HUANG Zhong-hua²

(Central South University, Changsha 410083 China)

[Abstract] Active suspensions have received lots of attentions in recent year. In this paper, two categories of active suspensions were introduced and compared, and some control methods which were used in the active suspension system, such as canopy damper control, optimal control, preview control, H_{∞} control and fuzzy control, were illustrated and evaluated.

Key words: Active vibration control; Active suspension; Control method; Automobile

近年来,车辆的主动悬架系统在理论研究和开发应用方面都取得了很大的进展.这方面的研究开始于铁道车辆的振动控制,后来在一些赛车上取得了成功的应用.今天,在日本等国已开始成批量地在部分车型上装载主动悬架系统.主动悬架已成为国外汽车业的一个研究热点.

另一方面,主动悬架系统也是当代主动振动领域中发展最快、应用最成熟的事例之一.它的发展与当代控制理论(软件)、液压伺服技术、传感器技术和计算机技术(硬件)的发展有着密切的关系,同时也从一个角度反应和表示了主动振动控制的研究状况和应用前景.事实上,日本三河纤维中心曾经将类似系统成功地应用于纺织机的隔振,既提高了产品质量又改善了工作环境.本文根据国外汽车主动悬架的发展及作者的研究工作,对汽车液压主动悬架及控制技术的研究现状做了一个评述.

1 主动控制悬架的基本原理及类型

1.1 悬架的目的及主动悬架的意义

一般来说,车辆的悬架有两个目的:改善乘坐舒适性(平顺性)和操作稳定性(安全性).从某种意义上来说,这两个目的对悬架的要求是矛盾的:为了更有效地减缓路面不平引起的车体振动(乘坐舒适性),要求悬架较“软”;而欲使在转弯、启动或刹车时车体的侧倾、点头或后坐较小(操作稳定性),则又希望悬架能较“硬”.传统的悬架系统一般是由弹簧和阻尼器组成(图1).在这样一个由被动元件构成的系统中,所产生的控制力为 $F = C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_2(x_2 - x_1)$,这意味着控制力的大小将取决于系数 C_2 和 K_2 .而且,这两个系数一经确定,悬架的特性(选架的“软硬”程度)就被确定.可见,这样一个被动悬架在同时满足乘坐舒适性和操作稳定性的要求是困难的.而在主动悬架系统中,悬架控制力由系统本身的能源产生,从理论上说可以是任何变量的函数.而且,现代主动悬架还具有完整的检测和控制系统,能检测环境与车体的状态,主动及时地调节所需的控制力,从而达到所期望的控制效果,使乘坐舒适性和操作稳定性同时得到改善.

^{*} 收稿日期: 2002-12-26

基金项目: 教育部重点研究项目资助(2000-01131)

作者简介: 刘少军(1955),男,湖南新化人,博士生导师,教授.

1.2 主动悬架的类型和结构

就主动悬架的实际构造和类型而言,虽然电动主动悬架和磁流变主动悬架一直在被研究之中,但在实际车上得到应用的还是液压主动悬架.目前的液压主动悬架可分为两大类^[1].一个是瑞士 Volvo 公司研制的 Lotus 流量控制型,其基本原理是用一个高响应的流量控制阀直接控制一个双作用油缸(悬架执行器).该系统具有较高的响应性能(根据报道可达 30 Hz),但由于对一切路面干扰全靠主动控制来吸收,系统能耗大,而且为了保证高响应频率,需要较多的高价传感器,因此系统成本高,难以大规模推广.另一种类型是日本丰田、日产公司开发的压力控制型.该系统主要由一个带机械反馈滑阀的压力比例阀和一个带气体弹簧的油汽缸构成^[3].其控制按三种方式进行:外扰<2 Hz 时由压力比例阀进行比例控制;外扰在 2 Hz 到 7 Hz 的中频范围,由滑阀的机械反馈能进行伺服控制;7 Hz 以上的高频干扰,利用油缸中的气体弹簧吸收振动能源而减振.与 Lotus 型相比,该系统成本相对较低,能耗也小.自 80 年代末在是实车上使用以来,几经改造,现在已较大规模地走向市场.此外,在这个系统的基础上为了进一步减低成本和提高系统可靠性,日本丰田公司和名古屋大学还就以普通高速开关阀取代压力比例阀开展共同研究,并在实验室研究阶段证明了方案的可行性^[3],取得了一系列的研究成果.

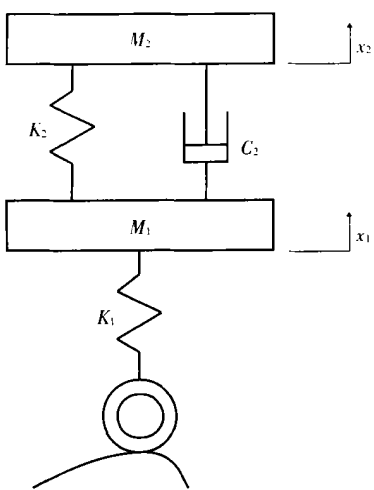


图 1 被动悬架系统模型

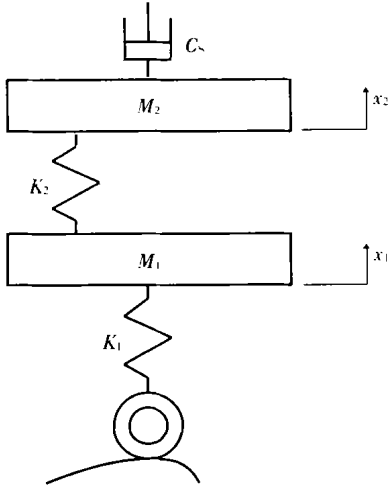


图 2 天棚阻尼器控制系统

2 主动悬架系统的控制方法及评述

目前已报道的有关主动悬架控制方法的研究几乎涉及到了现代控制理论的所有分支.不同的控制方法有不同的特点,以下对几种典型的控制方法进行评述.

2.1 天棚阻尼器控制

天棚阻尼器控制的主要思想是要求主动悬架产生一个与车体绝对速度成正比的控制力($F_s = C_s \dot{x}_2$)^[4],其力学模型可表示为图 2,与图 1 相比,该系统中增加了一个一端接在一个固定参照物(天棚)上的阻尼器.这就是‘天棚阻尼器’名字的由来.对于图 1 所示的被动系统,可得其运动方程式为

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_2(x_2 - x_1) = 0 \tag{1}$$

振动传递特性为

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{2\omega_2 \xi_{2s} + \omega_2}{s^2 + 2\omega_2 \xi_2 + \omega_2^2} \tag{2}$$

由(2)式可得其振动点的振幅比为

$$\left| \frac{x_2}{x_1} \right| = \sqrt{1 + \frac{1}{4\xi_2^2}} \tag{3}$$

可见,振幅比大于 1.而图 2 所示天棚阻尼器控制系统的运动方程式为

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_x \dot{x}_2 + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_2(x_2 - x_1) + C_s \dot{x}_2 = 0 \tag{4}$$

振动传递特性为

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{2\omega_2\xi_2s + \omega_2}{s^2 + 2\omega_2(\xi_2 + \xi_3)s + \omega_2^2}$$

(5)

共振点的振幅比为

$$\left|\frac{x_2}{x_1}\right| = \frac{\sqrt{4\xi_2^2 + 1}}{2(\xi_2 + \xi_3)}$$

(6)

如果在设计中让阻尼系数 ξ_3 满足条件

$$\xi_3 > \sqrt{4\xi_2^2 + 1}/4 - \xi_2$$

(7)

那么就能有 $\left|\frac{x_2}{x_1}\right|_{\omega=\omega_2} < 1$ 进一步, 对(6) 式求偏导并令

$$\frac{\partial |x_2/x_1|}{\partial \xi_2} = 0$$

(8)

可求得, 为使共振点的振幅比最小, 阻尼系数间的关系应为

$$\xi_2 = \frac{1}{4\xi_3}$$

(9)

在天棚阻尼器控制方式中, 控制力的决定取决于车体的绝对速度 x_2 的反馈, 不需要很多的传感器, 也不需要复杂的数学模型, 易于实现且比较可靠. 因此, 这种控制方法至今仍被实际车的主动悬架系统所采用. 然而, 问题的另一个方面是, 因为系统的反馈仅仅取决于车体的绝对速度, 且(7) 式表明, 为了使共振点的振幅比小于 1, 将要求较大的系数 ξ_3 . 这意味着系统将要求较大的反馈增益, 在能量消耗方面是不利的因素.

2.2 最优控制

有关主动悬架的最优控制问题的研究较多, 早期的方法是对系统中的某些性能指标处以惩罚, 比如, 对一个 1/4 车体模型, 可提出一个评价函数为

$$PI = E(x_1^2 + r_1x_2^2 + rx_3^2)$$

这里, x_1 为车体加速度, 反应乘坐舒适性; x_2 为车轮轮胎相对于平衡点的变形, 反应车轮着地性能 (从而间接地反应车辆的操作稳定性); x_3 为悬架行程相对于平衡状态的变化, 该值的大小表示了所需要的悬架行程空间. r_1 和 r_2 为加权系数, 例如, 如果希望悬架变形小, 应该取大的 r_2 值. 可见, 对上式进行最优设计而得到的悬架控制力, 将在保证操作稳定性和悬架行程限制的条件下获得最优的乘坐舒适性. 有关这类研究扩展到了半车模型和整车模型, 取得一些理论上的研究结果. 近年来应用的较多的是基于线性二次型问题的最优调节器控制, 该问题的描述:

寻找一个最优控制信号, 使得评价函数:

$$J = \int_0^\infty [x^T(t) Qx(t) + u^T Ru(t)] dt$$

(11)

取极小值, 其中 x, u 分别是状态量和控制量, Q, R 为加权系数 (矩阵). 从控制理论来看, 式(11) 所示的最优控制意味着, 当受到外界干扰时, 系统将力图在某种性能指标最优 (取决于 Q, R 的选择) 的前提下尽快地恢复到稳定状态. 日本的松下、永井等人应用这种方法为铁路车辆的气动主动悬架设计过一些最优控制器, 取得了一些好的实验效果, 作者也应用上述方法为日本丰田的油气压主动悬架装置 (高速开关阀控制) 设计了一个带状态观测器的最优调节器, 实验说明其控制性能高于天棚阻尼器控制^[3].

采用最优调节器控制的主要问题在于要求系统有较准确和稳定的数学模型, 其系统的复杂性 (如传感器数量) 等将随数学模型阶数的增加而增加.

2.3 预见控制

在天棚阻尼器控制和最优控制设计中都未对路面的状态给与考虑, 事实上, 这些设计是基于路面干扰为白噪声的这样一个假设. 即使是最优, 也只是平均意义的最优, 对每个单个的样本函数并不一定最优. 此外, 由于实际车上主动悬架系统中的能源和元件响应速度的限制, 系统很难对应于反馈信号产生

及时和足够大的控制力,从而限制系统减振效果.所谓预见控制,是系统通过某些方法对车辆前方的路面状况进行检测,并根据这个情况决定相应的控制力,由于能针对具体实际路面情况,并且有较充分的时间做决策和调整,因此系统可望获得好的控制效果.

预见控制的实质是将前方路面的状态作为预见变量进行前馈,不少学者们构造过一些算法,取得过一些结果,本文作者也曾采用过扩展误差系统方法,将预见控制问题转化为一个LQG 问题求解,并在日本丰田汽车的主动悬架模拟装置上实施了仿真和实验研究.实验结果表明,采用预见控制方式时,在谐波状路面干扰和阶梯状路面干扰下,系统都具有比最优控制方式下更好的减振性能,尤其在阶梯状路面干扰(突加干扰)下特别显著,说明预见控制方式的确能弥补系统响应速度不足而提高控制效果^[9],是一种有前途的控制方式.

在实际中实施预见控制的一个关键问题在于预见信息的获得.日本三菱公司曾采用过在车头上安装超声波预见传感器的方案,也进行了实验车的试验,但一直未实用.另一种方案是只将前轮上得到的路况信息作为预见情报对后轮进行预见控制.中国留日学生项东辉等所做的仿真研究表明这是一种可行且有效的方法^[1].本文作者的研究也证明了这一点^[3].

2.4 H_{∞} 控制

随着近年来 H_{∞} 控制理论的发展和盛行,有些学者也将 H_{∞} 控制方法应用到了主动悬架的控制设计中.汽车主动悬架的 H_{∞} 控制有如下两个主要优点:

- a. 考虑到人类对不同频率的振动的反应敏感程度不同,在人类对振动的反应敏感区(研究结果表明为 4~8 Hz)内实行较大的反馈增益,从而产生较大的控制输出;
- b. 考虑到系统数学模型的不确定性(建模的误差、乘员数变化等引起的系统参数变化等),保证系统的稳定性.

主动悬架的 H_{∞} 控制设计通常采用回路整形技术,其主要手段是以灵敏度函数和补灵敏度函数分别反应系统的性能品质(如振动特性)和鲁棒性,根据控制目的,在不同频率范围内分别对灵敏度函数和补灵敏度函数给予不同程度的惩罚,从而保证希望的控制效果.例如,在人类振动反应敏感频率区内使悬架具有良好的隔振特性、在高频时保证系统的稳定性.日本的川谷等曾针对丰田汽车公司的主动悬架系统做过这方面的研究,并在实车上取得了很好的实验结果.本文作者也为所建的高速开关阀液压主动悬架系统设计过一个 H_{∞} 控制器,仿真结果表明,与最优控制方式相比,系统在 4~8 Hz 范围内的隔振效果和 10 Hz 以上时的系统稳定性均得到加强^[9].这种方法的实质是合理的分配和使用系统的控制能量来取得有效而实用的控制效果,使系统的性能指标和稳定性均得到满足,对于汽车这样一种大众产品而言非常有益.但由于设计复杂、所得控制器阶数较高等原因,在实车上实施尚有一些问题需要解决.

2.5 模糊控制

汽车主动悬架系统是一个复杂的非线性系统,其数学模型相当复杂,采用已有的常规的控制理论很难达到好的控制效果.而模糊控制系统由于不需要建立系统精确的数学模型,可以避免因系统建模误差带来的影响,从而取得较好的控制效果.

模糊控制应用于车辆的主动悬架设计始于 90 年代初,且正被投以越来越多的关注.1992 年 Yeh 和 Tsao 首次应用模糊控制,使车辆在非常不平的路面上行驶时,悬置质量仍基本保持水平,且执行器始终工作在允许的范围内.1994 年,他们又提出模糊预见控制方案,结果证明能取得令人满意的性能效果.

1993 年 Lin et al 利用真实车辆的悬架特性和数据,构造了一个基于 1/4 车辆模型 MRST-PLC 控制器.仿真结果表明,所提出的模糊逻辑控制器,能提供趋近于 0 的悬置质量加速度,有效的改善了乘坐舒适性,而且具有较好的鲁棒性.

1996 年 Yoshi mura 将模糊推理应用于半主动悬架.该车辆系统由非线性微分方程模描述,通过模糊推理从若干类阻尼力中选择合适的一类阻尼力.仿真结果表明,所提出的半主动悬架大大改善了车身的加速度^[9].

1998 年,美国的 Viassolo 对 1/4 车体进行了模糊控制的研究,他以车身的垂直加速度最小为控制目

标,采用双闭环结构的控制系统.内环控制非线性的液压执行器跟踪给定的控制力 F_{cmd} ,外环采用模糊控制器,其控制参数通过基于遗传算法的最优控制确定.计算表明采用模糊控制可以取得很好的控制效果^[19].

国内也进行了有关模糊控制的研究,但主要局限于从系统的角度采用模糊控制策略研究执行器要产生的控制力的大小,而没有涉及到具体执行器如何实现和控制的,研究的结果也仅局限于系统的仿真阶段,很少有试验装置和实际结果.

模糊控制系统具有较好的鲁棒性.这是由模糊控制器内在的原理决定的.模糊控制的输入输出变量本身就是模糊化的,它不依赖于系统精确的物理参数.因此可以很好的适应系统的时变.这对实际车体控制很有意义,因为实际车体的参数是随车成员的数量、燃油、载荷等外部因素而时变的.

2.6 其它控制方法

除了上述的控制方法外,有些学者还做过其他一些探讨,比如自适应控制、神经网络控制、两时间系统控制等等,都从某些方面取得一些进展,但也还都停留在数字仿真阶段.这些方法的有关情况已在其他一些文献中(如文献[14])得到了较详细的介绍,本文不再赘述.

3 主动悬架系统的研究方向与发展前景

尽管有关车辆主动悬架及其控制系统的研究已取得较大的进展,但离大量地在普通车上推广应用尚有很多工作待做,目前的研究工作和发展趋势主要集中在如下两个方面:

一是继续研究开发低能耗、低造价的悬架系统.尽管前文已谈到日本丰田公司开发的压力控制型主动悬架有一定的价格优势,但相对大众车型而言造价仍然过于昂贵.安装一套丰田的悬架系统将使车辆售价增加约130万日元(相当于日本一辆普通车售价的三分之一).而且,这套系统自重约60kg,并消耗较大能量,这些都影响了这套系统的大规模普及应用.因此,研究者和制造厂家一直在致力追求降低主动悬架的制造成本和能耗量,如改进控制方式以减小系统中的传感器数量;研究以低价的普通元件来取代一些特制的元件(如丰田公司正尝试用普通的高速开关阀来代替特制的压力比例阀),等等.还有一种努力是考虑当前的现状,继续研究和开发具有较高性能的半主动悬架以用于中低档车.

另一条途径是借助现代控制理论的发展和应用,探讨和设计一些结构相对简单、控制效果较好的控制器.例如,不少研究者们认为:对前轮悬架采用反馈控制(如最优调节器控制),而利用前轮所获路面信息而对后轮进行具有前馈功能的预见控制的控制方式将是一种能兼顾系统性能和成本的方案.一些操作性好、智能度高的控制方式,如神经网络控制技术等设计的悬架系统控制器,也表现出了较好的应用发展前景.当然,可以相信,随着控制理论与技术的发展和人们对主动悬架控制问题认识的加深,将不断有新的更好的主动悬架系统及控制方式产生.

参 考 文 献

- [1] Kayaba IND Co Ltd. Automotive Suspension[S]. 1991(in Japanese)
- [2] 刘少军.由高速ON/OFF阀操作的主动悬架系统及控制方法研究[J].汽车工程,1996,18(4):.
- [3] 刘少军,郭淑娟.高速ON/OFF电磁阀在汽车主动控制悬架系统中的应用[J].中南工业大学学报,1996,27(3)
- [4] Karnopp D, Grosby MJ, Harwood R A. Vibration Control Using Semi-Active Force Generation[J]. Journal of Engineering for industry, ASME, May 1974. 619-624.
- [5] Liu Shaqun. Optimal Control of An Active Suspension System Employing High Speed ON/OFF solenoid Valve[J]. J. CEST SOUTH UNIV TECHNOL, 1997, 4(4): 36-40.
- [6] 刘少军.最优预见控制设计及在汽车主动悬架系统中的应用[J].中南工业大学学报,1997,28(2): 67-70.
- [7] 项东辉,土谷.走行移动体の姿勢制御に「ずけち」御方式について[A],(日)计测自动制御学会论文集[C].1993,29(6): 685-693.
- [8] 刘少军.基于高速开关阀技术的液压主动隔振系统及控制策略研究[D].中南工业大学博士学位论文,1997.
- [9] Yoshi mura T, Nakaminami K. A semi-active suspension with dynamic absorbers of ground vehicles using fuzzy reasoning[J]. Int J of Vehicle Design, 1997, 18(1): 19-24.
- [10] Daniel E. Viassolo Fuzzy control for active suspensions Mechatronics V10[J]. Issue 8 2000, 10: 897-920.
- [11] 张庙康,胡海岩.车辆悬架振动控制系统研究的发展[J].振动测试与诊断,1997,17(1): 43-46.