

汽车主动安全控制液压执行器的性能与原理*

王会义 于良耀 宋 健

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 介绍目前汽车主动安全系统(汽车制动防抱系统、汽车驱动力控制系统、汽车电子稳定控制系统、汽车主动悬架、汽车四轮转向系统)上所应用的液压执行器,并重点分析目前先进的汽车主动安全系统——汽车电子稳定控制程序(Electronic stability program, ESP)上的液压执行器的结构、工作原理、工艺特点及其高速响应的性能特点。ESP 所使用的液压执行器的响应速度在 10 ms 以内,其响应特性与液压执行器的各部分结构参数、被控车辆制动系统的参数等有紧密的联系,需要进行综合考虑和选择。介绍所采用的对汽车制动防抱系统液压执行器进行动态特性分析和参数匹配的建模分析方法,此方法同时也适用于对其他类型汽车主动安全系统的动态特性分析与参数匹配。最后对未来的汽车主动安全系统执行器的发展进行展望。

关键词: 汽车液压执行器 电子稳定控制程序 调节阀

中图分类号: TH137

0 前言

在工业发展过程中,汽车一直是新技术的有效载体。从 100 多年前的蒸汽汽车到目前正在开发的燃料电池汽车,其开发过程中无不是伴随着各种新技术的使用。新技术在汽车上的应用,目的不外乎是为了提高其动力性、经济性、操纵稳定性以及舒适性。在解决汽车动力性与经济性时,发动机采用电子控制是一个十分重要的方式。汽油发动机的新结构中,缸内直接喷射技术的直接控制对象是电磁阀。成熟的柴油发动机电子控制系统采用的是燃油高压共轨技术,其直接的控制对象是对燃油供给轨道上的燃油进行流量和压力调节的电磁阀,燃油到达燃烧室的压力从原来的 60 MPa 提高到 100 MPa。

同样,在汽车传动系统中,除传统的液力变矩器在自动变速器中广泛使用外,目前在国外商用车和部分轿车上使用的一种经济型自动变速器——自动机械式变速器(AMT)也采用了高速开关阀控制方式来操纵变速系统的选挡、换挡和离合装置。在汽车转向系统中,传统的液压助力转向器仍然占据着很大的应用市场。在此基础上,出现了电控液压助力转向系统。为了提高车辆系统的驾驶舒适性,又出现了汽车主动悬架。成熟的主动悬架有油气主动悬架和液压主动悬架。如图 1 所示是法国 Citroen 公司的液压主动悬架系统,该系统能够和制

动系统结合,有效地改善汽车制动过程中的点头现象,提高了驾驶和乘坐的舒适性。

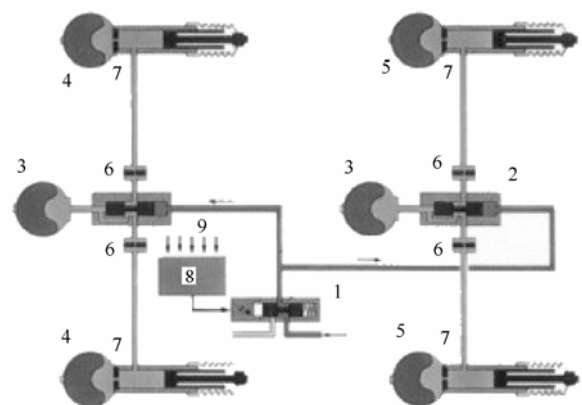


图 1 法国 Citroen 公司的液压主动悬架系统
1. 电磁阀 2. 刚度调节器 3、4、5. 液气装置
6、7. 阻尼器 8. 计算机 9. 传感器

汽车安全系统分为被动安全系统和主动安全系统。被动安全系统指汽车事故发生后保护驾驶员和乘员的系统和装置,主动安全系统则是指如何防止和避免事故发生的系统和装置。本文讨论的主动安全系统则主要指提高汽车驾驶的操纵稳定性能的主动安全系统。图 2 是目前日本学者提出的汽车整车主动控制的各种组合方式^[1],按照此方法,可以得到结合汽车制动防抱系统(Anti-lock braking system, ABS)、汽车驱动力控制系统(Traction control system, TCS)、主动悬架(Active suspension, AS)和四轮转向控制(4-wheel steering, 4WS)的汽车复合控制区域,如图 2 中菱形部分所示。

* 国家自然科学基金资助项目(50575120)。20060911 收到初稿,20070607 收到修改稿

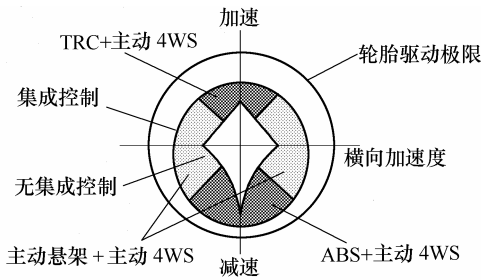


图 2 汽车整车主动控制的各种组合方式

汽车主动安全系统的执行机构将有利于 ABS、TCS、AS、4WS 等方面的执行机构。在此基础之上，结合智能交通系统(Intelligent transportation system, ITS)中的环境信息识别，具备自动行驶速度调节的自适应巡航控制(Adaptive cruise control, ACC)系统也是近年来的研究热点，并已在部分汽车公司的高档轿车上得以实现。

1 汽车主动安全控制系统中的关键液压执行器

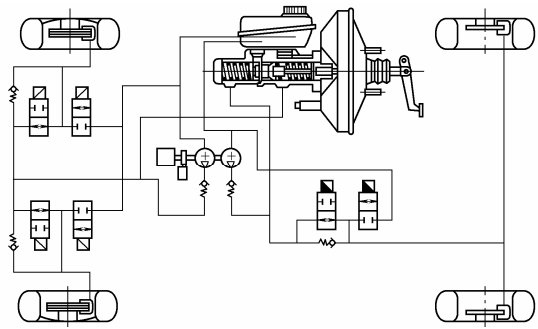
1.1 汽车纵向力和侧向力控制系统中的关键液压执行器

ABS 和 TCS 是对汽车行驶过程中纵向力进行控制。随着汽车行驶速度的提高，以及解决汽车在通过突变附着系数路面保持稳定驾驶的能力，人们对汽车行驶过程中侧向力的控制也提出了要求。由于在汽车行驶过程中作用在汽车上的侧向力体现为作用在整车上的力偶矩，即是对作用在汽车上的横摆力偶矩提出了进行调节的要求。在保留系统原有的 ABS/TCS 功能的前提下，增加对车辆横摆力偶矩的控制，这也即是目前正在成长过程中的汽车动力学控制系统。根据使用该技术的汽车公司的不同，其又被称为汽车电子稳定控制程序(Electronic stability program, ESP)，或汽车稳定控制系统等。

1.1.1 ABS 液压执行器

无论是 TCS 还是 ESP，ABS 的液压控制单元是基本的液压执行器，TCS 和 ESP 的执行器都以此为基础进行功能上的增加。图 3a 显示了一个基本的液压 ABS 控制通道情况，图 3b 显示了一个实际的 ABS 的液压执行器。

ABS 液压执行器是一个集成度很高、功能完善的液压系统，由 2 个柱塞泵、2 个低压蓄能器、2 个阻尼器、4 个高速开关阀阀组组成，外形尺寸在 100 mm×100 mm×50 mm 以内。每个高速开关阀阀组分别由一个增压阀和一个减压阀组成。增压阀和减压阀均为二位二通的电磁阀，其中增压阀为常开阀，减压阀为常闭阀，每个制动轮缸都由一套独立



(a) 原理图



(b) 实物图

图 3 ABS 液压执行器的系统示意图

的增、减压阀对自身的制动压力进行调节。ABS 通过对电磁线圈施加控制信号来控制增压阀和减压阀的通断，以实现增压、保压和减压的防抱死制动过程。

(1) 在增压阶段，增、减压阀上均无电信号，增压阀打开，减压阀关闭，由制动主缸过来的制动液不能进入减压回路，先后通过增压阀节流器和增压阀阀口进入相应的制动管路，并经过制动软管进入制动轮缸，使制动压力不断升高。

(2) 在保压阶段，只对增压阀施加电信号使其关闭，这样便切断了制动轮缸与制动主缸之间的联系，使其内部压力保持不变。

(3) 在减压阶段，对增、减压阀同时施加电信号，增压阀关闭，减压阀打开，使各制动轮缸与减压回路相连通，轮缸中的制动液便先后通过减压阀节流器和减压阀阀口进入弹簧活塞式蓄能器，实现制动压力的降低。此时，如果 ABS 制动已经结束，蓄能器中的制动液会在回油泵的作用下随制动踏板的抬起排回制动主缸；如果 ABS 制动还未结束，制动液会在回油泵和增压阀之间聚积成一高压区域，等增压阀打开时再次进入轮缸。在回油泵和制动主缸之间，阻尼器对降低液压脉动和噪声起了很大的作用。

随着 ABS 技术的发展，液压控制单元也越来越紧凑、精密，控制精度也在逐步提高，所有这些都对 ABS 液压制动系统的设计提出了更高的要求。目前，ABS 的液压制动系统的动作响应时间都在毫秒

级^[2-3]。

将图3所示典型的ABS液压执行器进行解剖分析后，可以看出，ABS进行压力调节过程所需要的各种元件都集成在一个尺寸小于100mm×100mm×40mm的方形铝质阀体中，如图4所示^[2]。

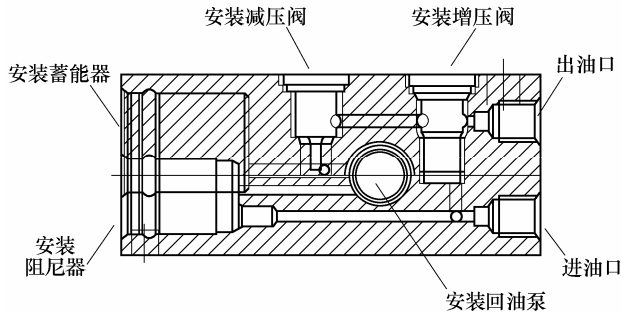


图4 典型ABS液压执行器的阀体布置

ABS液压执行器中，增压阀是二位二通常开阀，减压阀是二位二通常闭阀，其结构和工作原理相似，下面以增压阀为例进行分析。

增压阀的结构如图5所示，电磁线圈套在隔磁管外面，不通电时，阀心在回位弹簧的作用下处于常开状态，通电后在电磁力的作用下关闭，切断了主缸与轮缸之间的压力传送。

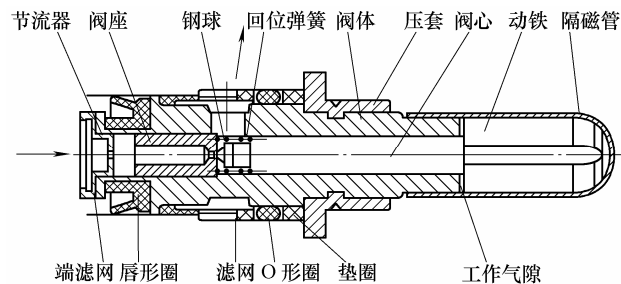


图5 ABS增压阀结构

图5中隔磁管主要用于密封增压阀，对动铁的运动起导向作用。隔磁管以滚焊的方式与阀体连接，它与阀体之间的相对位置直接影响到动铁的行程，进而影响电磁阀的响应特性，所以焊接时应当精确定位。隔磁管与阀体为H8/m7过渡配合，以保证装配同轴度。隔磁管材料选为1Cr18Ni2，为非铁磁性材料，这是因为隔磁管处于线圈和动铁之间，磁路的形成必须要经过隔磁管，如果选用铁磁材料，磁力线会通过隔磁管形成回路，大大减少了动铁上的电磁力。

动铁是磁路的一部分，是电磁力的载体，推动阀心关闭电磁阀，选用低碳钢材料。动铁上开有两个沟槽，使其两端油液相通，以减少压力差引起的液阻力。

阀心材料为镍铬合金，属于非铁磁性材料，与

隔磁管类似，这是为了使磁力线通过工作气隙，产生电磁力。

压套以挤压变形的方式和阀体连接，起支撑整个增压阀的作用，并且它也是磁路的一部分，选用铁磁性材料。

阀座在电磁阀工作的过程中不断受到阀心的敲击，所以它与阀体之间选用较紧的过盈配合H7/s6。顶端的锥面与阀心的钢球相接触。

节流器为增压阀的重要部件，它上面的节流孔径对液压单元的调压特性有重要影响，需要在ABS匹配时调整。

回位弹簧选用碳素弹簧钢，端部磨平。

装配时先将整个增压阀放入本体内，靠阀体上的最大截面处和压套外缘两个部位与本体之间的H7/h6配合保证基本的装配精度，然后挤压本体变形，变形材料压住压套的上表面实现定位。

对于轿车用ABS系统，其增压阀的节流孔孔径在0.3~0.7mm。一般来讲，减压阀的节流孔孔径比增压阀的节流孔孔径稍大，在0.4~0.8mm之间。如此细小的孔径使ABS液压执行器的加工难度很大。

回油泵的结构如图6所示。此回油泵是往复单柱塞泵，在电动机偏心轮的驱动下，将减压阀送来的制动液泵入高压阻尼器，返回增压阀或主缸。两个回流泵对称地分布于电动机轴两侧，通过联动装置实现协调运动，分别泵回前后制动管路的制动液。图6中柱塞左移时，右侧单向阀关闭，左侧单向阀打开，油液进入二者之间的空腔；柱塞右移时，左侧单向阀关闭，右侧单向阀打开，油液从空腔流出泵体。制动液的流动方向如图6中箭头所示。

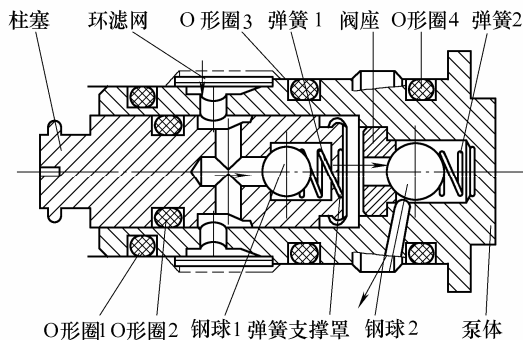


图6 ABS液压执行器回油泵结构

回油泵柱塞工作时在泵体内往复运动，与泵体H7/g6小间隙配合，中部装O形圈实现动密封。柱塞左端与电动机轴上的偏心轮接触。泵体安装在本体上的回油泵孔中，与本体之间采用过渡配合，用于精密定位，保证泵体与本体孔的同轴度。泵体装

入后在图 6 中右端挤压本体变形, 实现轴向定位。

阀座安装在泵体中, 在柱塞左移吸油的过程中, 阀座两端承受着较大的压力差, 选用过盈量较大的配合。

低压蓄能器采用的是弹簧蓄能式结构, 结构简单。蓄能器的主要作用是补偿流量和吸收压力脉动。来自减压阀的制动液流量与回流泵的流量往往是不等的, 低压储能器用以平衡流量差, 可以使减压阀流过来的却还来不及进入回油泵的制动液暂时储存在其中。另外, 柱塞泵的往复运动在其吸入口造成压力波动, 如不有效防止, 会使减压阀的流量随之脉动, 进而造成制动系统压力不稳定。

高压阻尼器的结构如图 7 所示。回油泵泵出的制动液如果不经过高压阻尼器而直接进入制动主缸或进入增压阀, 都会引起剧烈的压力脉动, 使驾驶员的制动踏板处产生明显的冲击或使以后的增压过程不稳定。高压阻尼器的作用就在于消除压力脉动, 降低液压噪声。

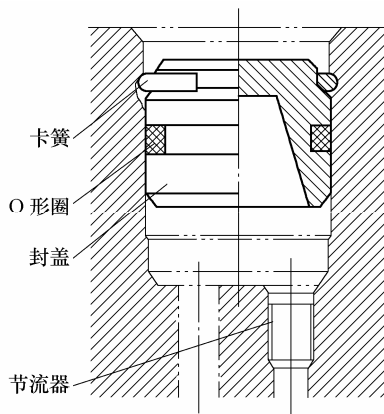


图 7 高压阻尼器结构示意图

1.1.2 TCS 液压执行器

牵引力控制系统 (Traction control system, TCS), 又称驱动防滑控制系统 (Anti-slip regulation, ASR), 是在 ABS 的基础上发展起来的一种主动安全控制系统, 其主要功能是防止汽车在起步、加速过程中驱动轮过度滑转, 增强车辆在驱动过程中的驱动能力和方向稳定性, 并在一定程度上改善汽车的加速性能。

调节作用于汽车上的牵引力有不同的方法, 其控制效果也有所不同。目前可用的调节方法大致有 4 种, 即发动机输出扭矩的调节、驱动轮制动力矩的调节、差速器锁止控制以及离合器或变速器控制。其中驱动轮制动力矩的调节就是在发生打滑的驱动轮上面施加制动力矩, 使车轮的转速降至最佳的滑转率范围内。因为制动力矩调节直接对驱动轮施加制动力矩, 所以可以提供最快的反应时间。这是 TCS

系统基本的控制方式。其执行器的结构与 ABS 的执行器结构类似, 由于其对驱动力矩的调节过程中没有驾驶员来踩下制动踏推动制动总泵产生制动压力, 因而需要由执行器独立产生制动液的压力, 并隔断与总泵的压力油出口。TCS 的液压执行器典型结构如图 8 所示。



图 8 TCS 的液压执行器典型结构

1.1.3 ESP 液压执行器

ESP 是在汽车制动防抱死系统和牵引力控制系统的基础上加入了主动横摆控制系统构成的, 对保证汽车行驶过程中的稳定性与安全性具有重要的意义。ESP 的液压控制系统由多个液压元件组成, 在电子控制单元的驱动下协同工作, 根据汽车的不同行驶工况对不同的车轮施加相应的液压力。目前, 国内生产的车辆所配置的 ESP 还来源于进口, 其国产化试制工作正在展开。

ESP 与其他汽车电子控制系统类似, 也由传感器、执行器、电子控制单元三部分组成。由于要感知汽车行驶过程中的状态量增加, 传感器部分除与 ABS 共用轮速传感器外, 还增加了方向盘转角传感器、汽车侧向加速度传感器、汽车横摆角速度传感器以及系统制动压力传感器。图 9 所示为德国 BOSCH 公司生产的 ESP 系统的各组成部分^[4]。

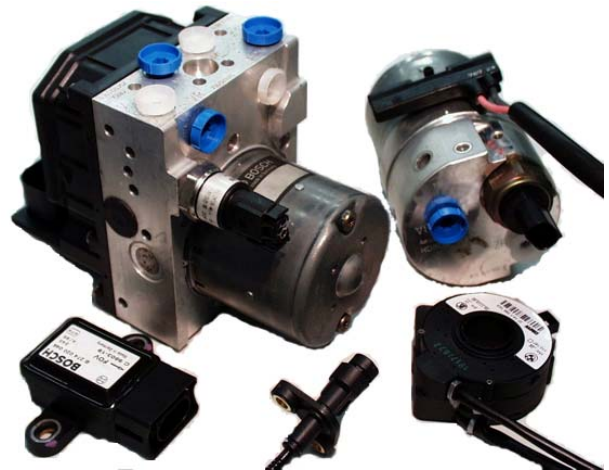


图 9 ESP 系统的组成部分

ESP 液压控制系统的组成如图 10 所示^[4], 在液

压执行器中共有 12 个电磁阀来接收电子控制单元的控制信号。

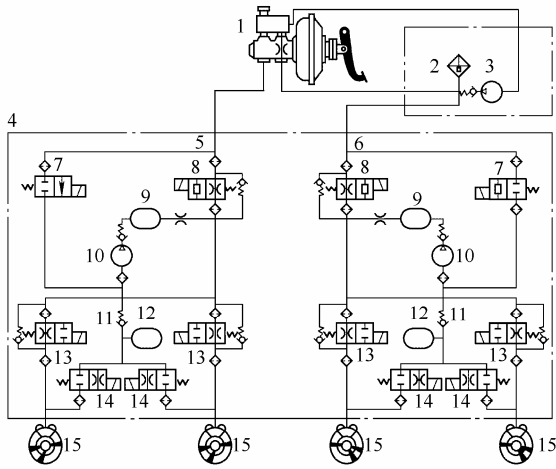


图 10 ESP 液压控制系统模型组成

- 1. 主缸 2. 压力传感器 3. 预压泵 4. 液压控制单元
- 5、6. 液压油路 7. 吸入阀 8. 限压阀 9. 阻尼器 10. 回流泵
- 11. 回流单向阀 12. 蓄能器 13. 增压阀 14. 减压阀 15. 轮缸

在系统传感器检测到相应的汽车信号，系统进入 ESP 工作模式后，限压阀 8 立刻从常通状态转变为限压状态，吸入阀 7 打开，制动液在预压泵 3 的作用下通过吸入阀 7、回油泵 10 进入阻尼器 9，在此减弱了油压脉动后通过增压阀 13 进入轮缸 15，推动轮缸 15 中的活塞，压紧摩擦片进行制动；当制动达到一定强度时，增压阀 13 和吸入阀 7 关闭，减压阀 14 打开，轮缸 15 中的高压制动液通过减压阀 14 进入蓄能器 12，此时的蓄能器 12 成为了下一次增压的油源；在新的增压过程中，制动液在回油泵 10 的作用下，从蓄能器 12 出发通过阻尼器 9，增压阀 13 再次进入轮缸。如此增减压循环直至系统退出 ESP 模式。

出于汽车安全性的需要，ESP 液压控制系统为一个高速响应系统，各电磁阀的动态响应均在 3 ms 以内完成。

1.2 AS 中的关键液压执行器

悬架是车身与车轮之间的一切传力连接装置的总称。它的作用是把路面作用于车轮上的垂直反力(支承力)、纵向反力(牵引力和制动力)和侧向反力以及这些反力所造成的力矩都传递到车身上，以保证汽车的正常行驶。汽车悬架尽管有各种不同的结构形式，但一般都是由弹性元件、减振器和导向机构三部分组成。如果从控制力的角度来分，则可将悬架分为被动悬架、半主动悬架和主动悬架三大类。目前大多数车辆上使用的都是被动式悬架，少数车辆使用了阻尼部分可调的半主动悬架。主动悬架由

于成本高，目前仅在高档轿车和高档客车上使用。

主动悬架是一种具有做功能力的悬架，通常包括产生力和扭矩的主动做用器(油缸、汽缸、伺服电动机、电磁铁等)、测量元件(如加速度、位移和力传感器等)和反馈控制器等。因此，主动悬架需要一个动力源(液压泵或空气压缩机等)为悬架系统提供连续的动力输入。当汽车载荷、行驶速度、路面状况等行驶条件发生变化时，主动悬架系统能自动调整悬架刚度(包括整体调整和各轮单独调整)，从而同时满足汽车的行驶平顺性、操纵稳定性等各方面的要求。

图 11 所示是图 1 所述主动悬架系统的各部分元件在 Citroen XM 轿车上的布置。

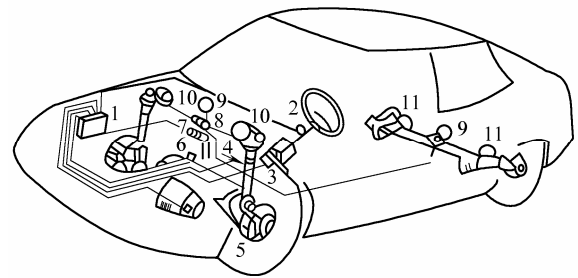


图 11 Citroen XM 轿车上 AS 的布置

- 1. 计算机 2. 转向盘转角传感器 3. 加速度传感器 4. 压力传感器
- 5. 车速传感器 6. 车身位移传感器 7. 电磁阀 8. 辅助液压阀
- 9. 刚度调节器 10. 前油气室 11. 后油气室

油气弹簧以气体(一般是气体氮)作为弹性介质，而用油液作为传力介质。它一般是由气体弹簧和相当于液力减振器的液压缸组成。通过油液压缩气室中的空气实现刚度特性，而通过电磁阀控制油液管路中的小孔节流实现变阻尼特性。从图 11 中可以看到，它有 5 个基本行车状态的传感器。其中，转向盘转角传感器安装于转向柱上，通过转向盘转角信号间接地把汽车转向程度(快慢、大小)的信息送给控制计算机。加速度传感器实际上是与油门踏板连接的油门动作传感器，间接地将加速动作信号送给计算机。制动压力传感器安装于制动管路中，当制动时，它向计算机发送一个阶跃信号，表示制动，使微机产生抑制“点头”的信号输出。车速传感器安装于车轮上，计算机利用车速信号和转向盘转角信号，可以计算出车身的侧倾程度。车身位移传感器安装于车身与车桥之间，用来测量车身与车桥的相对高度，其变化频率和幅度可反映车身的平顺性信息，同时还用于车高自动调节。

电磁阀在计算机指令下向右移动，从而接通压力油道，使辅助液压阀的阀心向左移动，中间的油气室与主油气室连通，使总的气室容积增加，气压减小，从而刚度变小，系统处于“软”状态。电磁

阀在计算机控制下无电流通过,在弹簧作用下,阀心左移,关闭压力油道,原来用于推动液压阀的压力油泄放,关闭刚度调节器,气室总容积减小,刚度增大,使系统处于“硬”状态。在正常行车状态时,系统处于“软”状态,以提高乘坐的舒适性,当高速、转向、起步和制动时,系统处于“硬”状态,以提高车辆的操纵稳定性。

1.3 4WS 系统中的关键液压执行器

转向系统是汽车的重要部分之一。转向系统的好坏直接影响汽车的操纵稳定性。普通汽车的转向一般都是靠驾驶员操纵方向盘,通过转向机构带动前轮的转动实现汽车的转向,前轮是转向轮。无转向的后轮与车身行进方向产生偏差,在后轮上产生侧偏角,从而生成转弯力,产生转向。因此,只有前轮转向动作开始后,后轮才开始转向,车身转动方向变化的,汽车的稳定性差。汽车 4WS 系统则是将后轮也作为转向轮,从而改善汽车高速时的操纵稳定性和减小低速时的转弯半径,提高驾驶的安全性。目前在众多拉力赛车上都采用了 4WS 技术。

4WS 系统中的液压执行器是后轮转向液压系统。驾驶员转动方向盘,产生的转向液压油被传输到控制后轮转向的控制阀上。4WS 控制计算机根据相应的算法控制阀心的动作,从而控制传输到后轮转向动力缸的液压油流量和压力,推动后轮转向。后轮的转向角还可以根据行驶速度的不同而变化,而当停车时,油泵不产生油压,后轮不转向。

2 汽车主动安全控制系统液压执行器的建模与分析

汽车主动安全控制系统的液压执行器的动作响应时间都在毫秒级,因此,对其进行动态研究,了解和掌握系统工作过程中的动态工作特性和参数变化,是非常必要的。对其进行建模分析是进行系统动态分析的基础^[5-6]。

汽车主动安全控制系统液压执行器的建模分为三个部分。

(1) 根据液压执行器中关键电磁阀结构,对其进行相应的电磁场和流场的有限元计算,得到电磁阀的电磁力特征。另外,通过对阻尼器及相关管路的流场有限元计算,得到阻尼器以及液压管路的工作特性。

(2) 从建立 ABS 液压制动系统各个模块的数学模型出发,以液压系统分析软件为平台,对 ABS 液压制动系统进行建模和仿真分析,明确了各重要参数对其动态响应特性的影响。

(3) 建立包含液压执行器在内,包括 15 自由度的整车动力学模型的综合仿真模型,与所设计的主动控制算法相结合进行联合仿真,对液压执行器所要应用的目标车型进行液压执行器参数匹配分析。

采用汽车主动安全系统液压执行器的建模与分析方法,笔者所在研究小组进行了包括越野汽车,小轿车在内的 ABS 液压执行单元的分析设计,提高了 ABS 的匹配质量并缩短了匹配的时间^[3-6]。

3 汽车主动安全控制系统执行器的未来发展趋势

随着信息技术和控制技术的发展,研究工作者能够设计制造出更安全、更舒适的汽车控制系统,目前汽车上采用的先进 ESP 系统的响应已经很快。在 ESP 控制过程中,系统由采集信号到获得制动力矩的变化,在各传递环节上都消耗一定的时间,一般由如下几部分组成:信号从车轮传感器到 ECU 的时间为 1 ms; ECU 发出指令到电磁阀开闭时间为 3 ms; 制动压力伺服控制动作时间为 5 ms; 制动压力转换到制动力矩迟滞,增压制动迟后时间为 15 ms,减压制动迟后时间为 10 ms。ESP 系统在不久还将与 4WS、AS 等其他主动安全系统配合,对整车进行综合调节与控制^[7-10]。那么,未来的汽车主动控制系统的执行器将会是怎样的?

(1) 成本低,体积小,质量轻是必然趋势。ESP 的新型液压执行器中,已经将预压泵去掉,通过改进回流泵结构,使 ESP 系统能够在-20℃情况下仍有效工作。这种设计不仅减小了液压执行器的体积,同时降低了系统的沿程阻力,提高了系统工作效率。

(2) 传感器在液压执行器中的集成是提高执行器可靠性的有效方法。无论是 ESP 系统,还是 AS 系统,系统中已经增加了压力传感器、加速度传感器等多个传感器。将压力传感器集成到液压执行器,将加速度传感器集成到电子控制单元 ECU 中,在减小系统体积和质量的同时,提高了系统的可靠性。

(3) 集成的电子液压系统是可以应用的有效的执行器。Benz 公司在其新型高档轿车中使用的灵巧制动控制(Sensotronic brake control, SBC)是线制制动的成功产品, SBC 由一个电控的液压泵和响应的电磁阀组成,制动踏脚不再作用在制动总泵上,而是作用在踏板行程传感器上,由传感器感知驾驶员的制动意图,再由计算机结合汽车的状态进行各个轮缸的压力控制。SBC 与传统的制动系统相比,更易实现 ABS/TCS 以及 ESP 的控制策略。

(4) 精简的电子机械制动系统将随着汽车 42V

电子系统的采用而逐渐成熟。各主要汽车公司以及关键汽车零部件企业已经开始了电子机械制动系统(EMB)的研究与试制工作, EMB中的执行机构由电动机驱动设计复杂的力或力矩放大机构。EMB也是一种线控制动的方案, 同样具有结构紧凑, 易于实现ABS/TCS和ESP的特点, 并且通过总线系统能够和汽车上其他电子系统进行信息共享和对汽车的协同控制。

4 结论

在对汽车主动安全系统进行阐述的基础上, 对目前主要的汽车主动安全系统的液压执行器进行了综合与分析。重点介绍了ABS以及ESP系统的液压执行器的结构、工作原理以及特点。分析了汽车主动安全系统液压执行器的建模与参数匹配分析方法。最后对未来的汽车主动安全系统执行器的发展进行了展望。

参 考 文 献

- [1] TANAKA H, INOUE H, IWATA H. Development of a vehicle integrated control system[C]//Proceedings of the XXIV FISITA Congress, 1992: 63-72.
- [2] 祁雪乐. ABS 液压制动系统动态特性的研究和综合仿真匹配平台的建立[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [3] 王会义, 高博. 液压式防抱制动系统电磁阀动作响应实验研究[J]. 液压与气动, 2001, 9: 2-4.
- [4] ANTON T Van Zanten. VDC systems development and perspective[R]. Robert Bosch GmbH. SAE Technical Paper, 980235.
- [5] PETRUCCELLI L, VELARDOCCIA M. Electro-hydraulic braking system modelling and simulation[R]. SAE Technical Paper, 2003-01-3336.
- [6] QI Xuele, SONG Jian, WANG Huiyi. Influence of hydraulic ABS parameters on solenoid valve dynamic response and braking effect[R]. SAE Paper, 2005-01-1590, 2005.
- [7] SCHAFER B J. Pradiktive fahrerassistenzsysteme-vom komfortsystem zur aktiven unfallvermeidung predictive safety systems—from convenience to active collision avoidance[J]. VDI Berichte, 2004(1 864): 37-46.
- [8] STOLL U. Sensotronic brake control (SBC)—die elektrohydraulische bremsen von mercedes-Benz[J]. VDI Berichte, 2003(1 789): 675-685.
- [9] LUIGI Petrucci, MAURO Velardocchia, SORNIOTTI. Electro-hydraulic braking system modelling and simulation [R]. SAE Technical Paper, 2003-01-3336.
- [10] SEMMLER S J, REITH P E. Global chassis control—the networked chassis[J]. Auto Technology, 2005(4): 38-42.

PERFORMANCE AND THEORY OF THE HYDRAULIC ACTUATORS FOR AUTOMOTIVE ACTIVE SAFETY CONTROL SYSTEM

WANG Huiyi YU Liangyao SONG Jian
(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The hydraulic actuators applied in the automotive active safety system, including anti-lock braking system, traction control system, electronics stability program, active suspension, 4-wheel steering system, are introduced. The hydraulic actuator used in the most advanced active safety system currently installed in the luxury cars is analyzed. The hydraulic actuator used in the electronics stability program (ESP) is required to have high speed to response the demand in 10 ms. The high responsibility, the parameters of the structure, the parameters of the vehicle system must be considered roundly. The method of modelling and simulating the hydraulic actuators for the automotive anti-lock braking system applied by the authors is introduced. This method can also be applied to other automotive active safety systems. Finally, the expectation of the actuator for the future active safety system is presented.

Key words: Hydraulic actuator of automobile
Electronics stability program
Modulating valve

作者简介: 王会义, 男, 1968年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为汽车动力学的仿真与控制及液压控制系统。

E-mail: hywang@tsinghua.edu.cn