

概 论

车辆悬架系统是指连接车体和车轮之间全部零部件的总称,它负责缓冲、吸收由路面不平度引起的车身振动并传递车轮与路面之间的驱动力、制动力,承受由于车辆运动工况的急剧改变而引起的各个方向上的惯性力等。优良的悬架系统可以使得车辆在不太理想甚至很恶劣的路面情况下仍能保持良好的运行状态和车辆的平稳性,在保证安全性的前提下保持理想的行驶速度。

1.1 车辆悬架的发展历程

悬架系统对车辆的行驶平顺性、操纵稳定性、乘坐舒适性、通过性、安全性等诸多方面都有很大的影响。随着社会的发展和人们对行驶性能要求的不断提高,悬架系统的设计和控制变得越来越重要。过去几十年间,悬架技术经历了从被动到主动的演变,为车辆提供了更高级别的悬架控制和性能优化。

早期的车辆悬架系统主要采用被动悬架。1934 年,世界上第一个由螺旋弹簧组成的被动悬架诞生。被动悬架使用弹簧和减振器来提供对道路不平整的缓冲和吸收作用,其悬架参数是根据经验或优化设计实现的,在悬架调节能力和驾驶舒适性方面存在一定的局限性,很难适应复杂多变的路况。随着道路交通的发展,车辆的行驶速度进一步提高,被动悬架的缺陷逐渐成为提高车辆性能的瓶颈。

1954 年,Federspiel-Labrosse^[1]最早提出了主动悬架控制概念。早期研究的数学模型忽略了非簧载质量和轮胎特性的单自由度系统。1976 年,Thompson^[2]研究了两个自由度的车辆模型,并应用空间状态技术和最优线性控制理论来确定控制律。随后 Thompson 等^[3]将两自由度模型扩充为四自由度模型,并研究了对白噪声输入的响应。1986 年,Chalassani^[4]研究了整车悬架模型的性能。随着研究的不断深入,主动悬架系统的研究和开发成果逐步实现,但因其结构复杂、成本高昂且能耗较高,往往只在高端豪华车型上配备,如奔驰 S 级和雷克萨斯 LS400 等。

半主动悬架的研究工作始于 1973 年,由 Crosby 和 Karnopp^[5]首先提出。半主动悬架以改变悬架的阻尼为主,其结构较为简单,工作时不需要消耗车辆的动力,就能取得与主动悬架相近的性能。20 世纪 80 年代中期以来,大量学者投入半主动悬架的研究,较为有影响的学者有 Karnopp、Margolis、Thompson 等,他们的研究大力推动了半主动悬架技术的发展。20 世纪 80 年代后期,福特、日产等知名车企开始陆续在中高端车型上搭载半主动悬架,如宝马 725、奔驰 ML250 等。1994 年,Prinkos 等使用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 年代后,半主动悬架的研究重点是新型智能材料的

应用,并相继取得突破性进展,如 Delphi 公司的 MagneRide 半主动悬架系统应用在 Cadillac Seville STS 高档车上。

伴随着主动悬架技术的蓬勃发展,国内外学者对主动悬架控制算法也进行了大量的研究,几乎涉及现代控制理论的所有分支。比较有代表性的控制算法有天棚阻尼控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制等^[6~9],各种控制方法对于主动悬架的控制效果各有利弊。理论上的研究方法虽然很多,且其中不乏现代控制理论中的最新成果,但真正投入实际应用的方法并不多。如何针对真实车辆的复杂行驶工况,采用合理的控制方法达到理想的控制效果仍然是主动悬架的研究重点。

随着科学技术的不断进步,特别是智能驾驶技术的不断发展,人们对主动控制悬架技术调控悬架参数、调整车身姿态等诸多方面产生了新的需求,也促使越来越多的新技术、新方法、新材料、新装备与主动悬架技术不断融合,为主动悬架技术的发展注入了新的活力。主动悬架结合道路预瞄技术能够通过感知装置提前预知路面状况,针对路面进行主动悬架的微调,提升与路面的适配度,如比亚迪的云辇系统、理想的魔毯空气悬架、蔚来的 4D 舒适领航等。在车辆底盘控制中,将主动悬架与转向系统以及制动系统相结合进行协调控制,多种驾驶模式设置可以满足不同驾驶场景的需求,如奔驰的 E-Active Body Control 系统。智能执行器的运用使底盘功能更强大的同时也增加了底盘控制的复杂程度,执行器间协调配合变得尤为重要,相应的控制系统可发挥其最大潜能,如采埃孚 cubiX 车辆运动控制系统,可融合控制各个底盘执行器。此外,硬件设备性能的提升是车辆主动悬架性能发展的必然需求,国内外众多生产厂商进行了诸多尝试,如 ClearMotion 主动悬架电驱单元控制器可以在 1ms 内完成信息处理计算和响应,高性能无刷电机每秒可进行 1000 次扭矩调整,实现对车身姿态实时调节。

主动悬架系统作为车辆悬架技术的最新发展方向,在提高驾驶舒适性、安全性和操控性方面发挥着重要的作用。目前,世界各主要汽车生产厂家对主动悬架技术的研制都投入了巨资,国内外专家学者在主动悬架领域的研究也陆续取得新的突破。随着技术的不断进步和创新,我们可以期待主动悬架系统在未来车辆领域的广泛应用,为驾驶员和乘客带来更加优越的车辆性能和行驶体验,并推动车辆工业的方向发展。

1.2 车辆悬架的分类

根据控制形式不同,可将悬架分为被动悬架、半主动悬架和全主动悬架,如图 1-1 所示。

1. 被动悬架

被动悬架系统主要由安装在簧载质量和非簧载质量之间的弹性元件和减振器(阻尼器)组成,悬架系统内无能源供给装置。被动悬架的弹性特性和阻尼特性是固定的,在行驶过程中不进行调节,也没有电子控制部分,当受到外界激励时,只能“被动”地做出响应。被动悬架因其制造装配容易、造价低廉的优势而广泛应用于车辆工业之中,但是其参数固定不可改变,也在很大程度上限制了车辆悬架系统的进一步优化,无法满足更高的性能要求。

2. 半主动悬架

半主动悬架通过可调刚度弹簧或可调阻尼的减振器实现调节,悬架系统内无能源供给

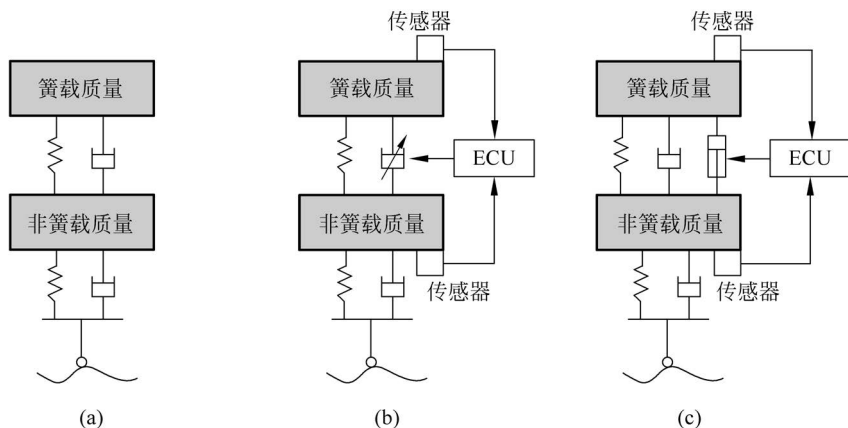


图 1-1 车辆悬架的分类

(a) 被动悬架；(b) 半主动悬架(阻尼可调)；(c) 主动悬架

装置。半主动悬架虽然不能随外界的输入进行最优的控制和调节,但电子控制单元(electronic control unit, ECU)可按各种条件下弹簧和减振器的优化参数指令来调节弹簧的刚度或减振器的阻尼,使悬架对复杂多变的路面状况具有较好的适应性。在车辆悬架中,弹性元件的作用是吸收和存储能量及承受车体的重量,在没有外加能源的条件下,改变刚度要比改变阻尼困难得多,因此对半主动悬架的研究多数采取阻尼可调的方法。

3. 全主动悬架

全主动悬架(又称主动悬架)的 ECU 基于传感器检测出的车辆振动状态和路面信息,根据所设计的控制策略向作动器发出控制指令,控制作动器输出合适的位移或力,“主动”地抵消路面的冲击作用,达到最佳化悬架系统减振效果的目的。此外,还可以防止车辆转向时车身侧倾及车辆加速或制动时的点头或蹲坐,保持车身的良好姿态,保证车辆转向或高速行驶时的稳定性和主动安全性。因为其所具有的优势,近年来主动悬架技术得到了长足的发展,目前已有不少豪华轿车及豪华 SUV 纷纷装上了主动悬架。对于已经上市的主动悬架,尽管还有很多不尽如人意的地方,但已经成为新型豪华轿车、SUV 的卖点之一。

1.3 主动悬架系统性能评价指标

悬架系统将车身和车轮轴连接在一起,用于传递车轮和车身质量之间的力和力矩,削减来自路面的冲击和振动。因此,悬架性能好坏对车辆行驶的平顺性和操纵的稳定性都有着很大的影响。能表征车辆悬架性能的评价指标是衡量一个悬架系统优劣程度的标准,也是后续控制和仿真的目标和对象。常用的悬架性能评价指标有以下几种:

(1) 簧载质量振动加速度。簧载质量振动加速度通过车身振动加速度的均方根值来评价车辆行驶过程中平顺性的好坏,是直接反映车辆行驶平顺性的重要指标。簧载质量振动加速度越大,则垂向振动强度越大,乘坐舒适性越差,行驶的平顺性也就越差,要提高行驶平顺性就要最大限度地降低簧载质量振动加速度。

(2) 车辆悬架动行程。车辆悬架动行程用于评价车身姿态变化程度,要想车身振动尽量小,势必要为主动悬架提供一定的行程范围。悬架动行程太大,在行驶过程中悬架撞击限位块的概率将增大,易对车身造成冲击。同时,悬架动行程过大也会对车辆的前轮定位产生影响,若悬架动行程太小,则悬架系统吸收振动的能力不足,振动将更多地传递给车身,影响车辆行驶的平顺性。由此可见,悬架动行程直接影响到车辆行驶的平顺性,是反映主动悬架系统性能的重要指标之一。

(3) 轮胎动载荷。轮胎动载荷能在一定程度上反映车辆操纵的稳定性,是评价悬架系统性能的重要指标之一。当车辆行驶过程中的轮胎载荷发生变化时,轮胎与地面的接触面积也将随之变化,使轮胎的附着能力降低。在车辆行驶过程中,如果能保持稳定的法向轮胎载荷,则轮胎具有较好的附着性能;若轮胎动载荷波动剧烈,则轮胎的附着性能较差。

主动悬架的优越性不仅体现在隔离路面冲击的效果,还在于能通过自身调节使车身姿态得到较好的矫正,抑制车辆在急转弯、制动、加速时的侧倾和俯仰等惯性运动,使得车辆保持良好的平顺性和安全性。本书中描述的整车主动悬架控制指标主要有以下两点:

(1) 车身质心垂向振动位移、加速度。车身垂向振动极大地影响乘坐的舒适性,消耗大量的发动机功率,所以抑制车身垂向振动是主动悬架控制的主要目标之一。主动悬架通过自身控制策略将采集到的车身振动信号处理并传送给主动悬架执行机构,从而减少车身垂向振动。

(2) 车身俯仰角、侧倾角及其加速度。车辆行驶过程中由于各种路况、驾驶情况会产生俯仰和侧倾运动,主动悬架根据系统测算得到的侧倾角和俯仰角大小,经过控制算法输出至各个执行机构,从而抑制这种运动。

事实上,要想完全消除车身的以上两种运动是不可能的,只能尽量抑制车身振动、俯仰和侧倾姿态,以最大限度地保持车辆行驶的平顺性为研究目的。

1.4 主动悬架系统的基本功能

主动悬架的作用不仅表现在对复杂路面输入的隔振和减振效用,还在于其对车辆整体转弯时的侧倾、加速和减速时的俯仰等惯性动作的抑制作用,甚至在路面等级极差的条件下仍能使得乘驾人员处于相对更加平稳和舒适的驾驶状态。

总的来说,主动悬架系统实现了以下五项功能:

(1) 车身高度调整功能。车身高度调整功能是指当车辆的负载或使用工况发生改变时,均能通过电控悬架系统的参数调节保证适宜的车身高度。车身高度对车辆的动力性、燃油经济性、操纵稳定性、行驶平顺性及通过性都有较重要的影响,可通过对车辆不同使用条件下车身高度的控制实现更优异的使用性能。车身高度调整目标不仅指系统能够根据车身负载的变化自行调节,使车身高度不随载荷的变化而改变,还包括根据车辆的实际使用工况,对车身高度做出升高或降低的处理。

(2) 悬架系统阻尼控制功能。悬架系统阻尼控制功能是利用控制悬架系统阻尼特性的方式来控制车身上下振动、前倾后仰和“甩头”“摆尾”等现象。

(3) 悬架系统刚度控制功能。悬架系统刚度控制功能是利用控制悬架系统刚度特性的

方式来控制车辆的动态性能。悬架系统刚度特性是影响系统性能的重要因素,除车辆振动固有频率、悬架运动行程、轮胎动载荷和车身高度外,在车辆转弯过程中的“侧倾”,以及在加速和制动时车身出现的“点头”“后坐”等现象均与悬架系统的刚度有关。

(4) 悬架系统侧倾角刚度控制功能。悬架系统侧倾角刚度控制功能是利用控制悬架系统侧倾角刚度特性的方式来控制车辆的动态性能。悬架系统侧倾角刚度特性是影响车辆侧向动力学响应的重要因素之一。车辆在转弯时,在离心力的作用下,车身将发生侧倾的趋势。悬架系统侧倾角刚度控制功能通过悬架系统侧倾角刚度的调整来降低车辆转向时的侧倾角,以使车辆具有更好的乘坐舒适性和操纵稳定性。悬架系统侧倾角刚度控制除可以通过改变悬架系统刚度来实现外,最重要的途径是使用可控型的横向稳定杆来满足要求。可控型的横向稳定杆一般分为在稳定杆端部安装液压式的扭矩作动器和在稳定杆中部设置旋转电机式的扭矩作动器等类型。

(5) 车身姿态控制功能。车辆在行驶过程中,车身姿态不仅对车体的振动响应有强烈影响,还通过悬架导向机构对轮胎分力产生重要影响。通过对车身姿态的主动控制,可以综合改善车辆的驾乘舒适性、操纵稳定性等诸多性能。车身姿态的控制包括对侧倾、俯仰、横摆、跳动和车身高度的控制等。车身的侧倾小,则车轮外倾角度变化也小,轮胎就能较好地保持与地面垂直接触,使轮胎对地面的附着力提高,以充分发挥轮胎的制动作用。

参 考 文 献

- [1] FEDERSPIEL-LABROSSE J M. Beitrag zum Studium und zur Vervollkommnung der Aufhangung der Fahrzeuge[J]. Automobiltechnische Zeitschrift,1955,57(3): 6370.
- [2] THOMPSON A G. An active suspension with optimal linear state feedback[J]. Vehicle system dynamics,1976,5(4): 187-203.
- [3] THOMPSON A G,DAVIS B R,PEARCE C E M. An optimal linear active suspension with finite road preview[J]. SAE Transactions,1980: 2009-2020.
- [4] CHALASANI R M. Ride performance potential of active suspension system-Part 1[J]. ASME monograph,1986.
- [5] CROSBY M J,KARNOPP D C. The active damper: a new concept for shock and vibration control[J]. Shock and Vibration Bulletin,1973,43(4): 119-133.
- [6] PRIYANDOKO G,MAILAH M,JAMALUDDIN H. Vehicle active suspension system using skyhook adaptive neuro active force control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2009,23: 855-868.
- [7] GUO X,WANG J,SUN W. Nonlinear adaptive fault-tolerant control for full-car active suspension with velocity measurement errors and full-state constraints[J]. Journal of the Franklin Institute,2024,361(10): 106845.
- [8] YAGIZ N,SAKMAN L E. Fuzzy logic control of a full vehicle without suspension gap degeneration[J]. Int J of Vehicle Design,2006,42(1/2): 198-212.
- [9] LI Y,WANG T,LIU W,et al. Neural network adaptive output-feedback optimal control for active suspension systems[J]. IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics: Systems,2021,52(6): 4021-4032.

第 2 章

半主动悬架技术

2.1 概 述

半主动悬架使用可调刚度的弹簧或可调阻尼的减振器组成悬架系统,是一种有电子控制但没有能量输入(除了少量用来驱动电子控制单元的能量)的悬架。与传统被动悬架相比,主动悬架系统在车辆的行驶平顺性和操纵稳定性方面具有显著的优势,但是受到所需功率和成本等因素的限制,而半主动悬架可以通过较低的造价和复杂程度提供接近主动悬架的性能,是介于被动悬架和主动悬架之间的一类悬架^[1-4]。

2.1.1 半主动悬架的发展历程

半主动悬架概念的提出晚于被动悬架和主动悬架。1934 年,世界上出现了第一个由螺旋弹簧组成的被动悬架。被动悬架的弹簧刚度和减振器阻尼等参数根据经验或优化设计的方法确定,在行驶过程中保持不变,难以适应复杂路况,减振效果较差。主动悬架技术由通用汽车公司在 20 世纪 70 年代研发并推广,主动悬架使用有源的力发生器代替被动悬架结构,其控制装置通常由测量系统、控制系统和能源系统组成,可以使悬架在任何路面上都保持最佳的行驶状态。1973 年,美国加利福尼亚州大学戴维斯分校的 Karnopp 和 Crosby 首先提出了半主动悬架的概念^[5],Karnopp 还提出了天棚阻尼控制算法和对应的实现方法,通过对减振器阻尼系数的调节实现半主动减振控制。1975 年,Margolis 等提出“开关”半主动控制策略,其特点是当簧载质量和非簧载质量同向运动,且非簧载质量的速度较大时,控制关闭,不产生阻尼力或产生较小的力,而在其他情况下产生较大的阻尼力。1976 年,Hubbard 和 Margolis 提出了通过改变弹簧刚度来减振的半主动悬架结构^[6],该技术可在空气弹簧和油气弹簧中实现。

从 20 世纪 80 年代开始,随着电子技术和计算机技术的发展,半主动悬架逐步从实验室走向工厂,进入快速发展阶段。丰田和三菱等公司先后在 80 年代使用了由微电脑控制的阻尼分级调节式半主动悬架,减振器阻尼可在 2~3 级之间切换,称为“柔和”“适中”“稳定”三种状态。之后出现了可实现阻尼连续调节的悬架,如电磁阀半主动悬架,该悬架的控制系统由德国 ZF Sachs 公司于 2002 年成功开发,通过控制减振器内部的电磁阀来实现阻尼的连续调节,并广泛应用于高端车型。福特公司和丰田公司先后在部分车型上推出了电子控制空气悬架系统,该系统可以根据乘客数量或载重、车速、路面状况等对空气弹簧的刚度进行有级调节。Prinkos 等于 1994 年使用电流变体和磁流变体作为减振器工作介质,取得了一

定的成果。2002年,美国德尔福公司首次将包含磁流变减振器的半主动悬架系统应用在凯迪拉克 Seville STS 上,新材料的引入为半主动悬架带来了新的发展方向。

半主动悬架技术目前主要应用于高端车型。技术的进步和生产成本的降低使得更多的车型开始应用半主动悬架,一些汽车制造商开始在中档车型中提供半主动悬架的选项。电磁阀半主动悬架与磁流变半主动悬架应用最为广泛,ZF Sachs 等外国厂商已掌握了较为成熟的技术。国内学者对半主动悬架技术的研究起步较晚,但也取得了不错的成果,越来越多的国内厂商开始关注和研究半主动悬架技术。近年来,随着新能源汽车的发展与普及,悬架技术也开始尝试与新能源汽车结合,如轮毂电机半主动悬架;馈能悬架的概念由 Suda 等提出^[7],馈能悬架可采用电磁馈能等方式实现振动能量回收,非常契合新能源汽车的节能需求,目前成为主动悬架和半主动悬架研究的新方向。

2.1.2 半主动悬架的结构

半主动悬架系统使用可调刚度的弹性元件或可调阻尼的减振器替换被动悬架的相应部分,并配以检测系统和控制系统。半主动悬架通常由以下几部分组成:

(1) 执行机构。执行机构为可调刚度的弹簧(如空气弹簧、油气弹簧),或可调阻尼的减振器(如电磁阀减振器、磁流变减振器),是在被动悬架的弹簧或减振器上的升级,增加了参数主动调节的功能。

(2) 检测系统。检测系统包括各种车载传感器,作用是为控制算法实时提供车辆状态和路面情况等必要信息。不同的半主动悬架控制算法需要使用的传感器不同,常用的有加速度传感器、速度传感器、悬架位移传感器等。

(3) 控制系统。电子控制单元(electronic control unit, ECU)接收传感器的信息,使用半主动悬架控制算法计算执行机构所需调节的参数值,发出对应的控制信号控制执行机构。

图 1-1(b)为阻尼调节式半主动悬架原理图,控制器根据检测系统采集的簧载质量的加速度响应等反馈信号,按照一定的控制规律调节执行机构的参数,改变悬架弹簧的刚度或减振器的阻尼,以达到较好的减振控制效果,改善车辆的行驶平顺性和操纵稳定性。

2.1.3 半主动悬架的特点

1. 半主动悬架与被动悬架相比

(1) 半主动悬架可在车辆行驶过程中主动调节悬架参数,提高车辆的行驶平顺性和操纵稳定性。

(2) 半主动悬架可根据路面情况进行智能调节,降低车辆振动的损耗,提高车辆的燃油效率,在特定情况下更节能。

2. 半主动悬架与主动悬架相比

(1) 主动悬架需要占用车辆发动机的部分输出功率,而半主动悬架只需要一个较低的功耗去调节弹簧的刚度或减振器的阻尼,耗能相对较低。

(2) 半主动悬架一般是在被动悬架的基础上改进而来,基本不改变原车结构布局,无须额外占用车辆底盘的空间,相比需要额外能源系统的主动悬架,半主动悬架研发难度低、重量轻、成本低,更受市场欢迎,在商用汽车领域应用广泛。

(3) 半主动悬架始终处于能量耗散状态,且在控制系统失效的情况下可作为被动悬架使用,保证车辆行驶安全性。

(4) 半主动悬架的控制效果一般劣于主动悬架,只能调节悬架参数而无法施加主动作用力,在起步、转向和制动等工况下作用效果相对主动悬架较差。

2.1.4 半主动悬架的分类

半主动悬架的分类如图 2-1 所示。根据调节方式不同可分为刚度调节式和阻尼调节式两类,对应的模型见本书第 6 章。

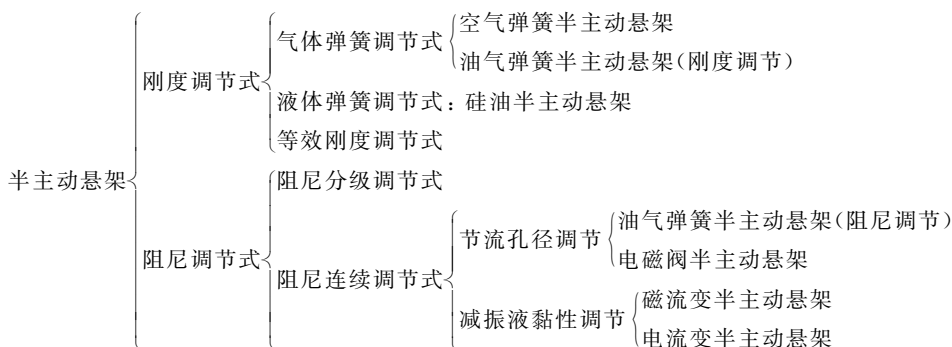


图 2-1 半主动悬架的分类

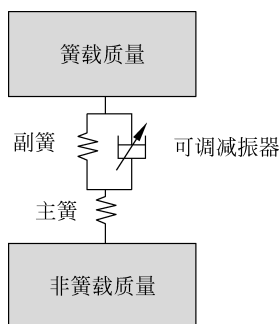


图 2-2 等效刚度调节式弹簧

刚度调节式半主动悬架一般通过控制气体弹簧或液体弹簧可压缩体积的变化来实现对刚度特性曲线的主动调节。气体弹簧分为空气弹簧和油气弹簧两种；液体弹簧例如硅油弹簧,使用可压缩的硅油作为弹性介质实现刚度调节。通过弹簧和可调减振器的串并联可以实现对悬架等效刚度的调节,如图 2-2 所示,当与副簧并联的减振器阻尼值趋于零时,悬架总刚度约等于主簧与副簧串联的等效刚度,当该减振器阻尼趋于无穷大时(减振器处于刚性状态),悬架总刚度约等于主簧的刚度。

阻尼调节式半主动悬架按照对阻尼大小的改变是否连续可分为阻尼分级调节式和阻尼连续调节式。分级调节的实现相对简单,一般使用较为简易的结构和控制算法;连续调节的方式会带来更好的减振性能,对其进行的研究已经取得了很大的进展。

阻尼连续调节式半主动悬架有节流孔径调节和减振液黏性调节等两种调节方式。节流孔径调节通过节流阀的通流面积改变油液阻尼,节流阀通常使用响应迅速的电磁阀,应用于油气悬架可组成油气弹簧半主动悬架,应用于液压减振器可组成电磁阀半主动悬架。减振

液黏性调节使用黏度可调的磁流变液或电流变液作为减振器油液,通过控制外加的磁场或电场可迅速改变液体剪切应力和黏度等物理性质,从而改变阻尼大小。

2.2 刚度调节式半主动悬架

在当今车辆工业高速发展和人们对车辆性能要求不断提高的形势下,性能优良的气体弹簧开始取代螺旋弹簧和钢板弹簧等传统弹簧,在大型客车、载重汽车和高端商用轿车上应用广泛。为了更好地适应车辆行驶的各种复杂工况,使悬架性能能够根据路面状况及乘员要求进行调整,气体弹簧的刚度特性就要实时改变。刚度调节式半主动悬架以气体弹簧调节式为主,其气体弹簧的刚度具有明显的非线性特性,本节以气体弹簧调节式为例进行介绍,可分为空气弹簧半主动悬架和油气弹簧半主动悬架。

2.2.1 空气弹簧半主动悬架

改变空气弹簧刚度特性主要通过改变空气弹簧内部气压、改变空气弹簧工作容积或通过温度调控等方法实现。改变空气弹簧内部气压可以通过对气囊充放气或改变气体黏度来实现,主动充气需要压缩机和储气罐的参与,增加成本与控制难度,气体黏度会随着气压和温度的改变而被动变化,主动控制难度较大。气体温度受到悬架做功产热和外界温度的热传导影响,通过温度调控并没有准确且快速的调控手段。改变空气弹簧工作容积可以通过在主气室外增加副气室,并通过通断气室间的管道接口实现,操作简便,易于实现,更具有现实意义。

改变空气弹簧工作容积的方式主要有容积有级可调式和容积连续可调式两种。

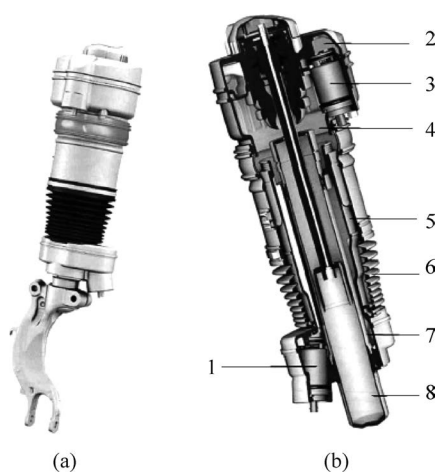
1. 容积有级可调式

容积有级可调式空气弹簧在主气室外设置一个或多个副气室,通过控制气室间的通断实现刚度特性有级调节。以2018款保时捷Cayenne三腔室空气悬架(前桥)为例(图2-3),该悬架的空气弹簧分为三个气室,第一气室4作为主气室,两个开关阀1和3分别控制两个副气室7和2的通断,根据用户选择的驾驶模式和路况设置合适的弹簧参数^[8]。

2. 容积连续可调式

容积连续可调式空气弹簧对附加气室容积的连续调节使得车辆在不同工况下通过适配的控制算法始终获得较好的控制效果,与该技术相关的控制算法和结构设计目前尚处于研究阶段。

以容积连续可调式空气悬架为研究对象,文献[9]提出了附加气室容积可调式空气悬架系统分层控制策略,设计了基于区间-免疫算法的上层附加气室容积控制器和以主、附加气室内气体质量为控制目标的下层气体质量流量模糊控制器,从而保证车辆在不同的工况下均可获得较好的控制效果,提高了悬架的综合性能。

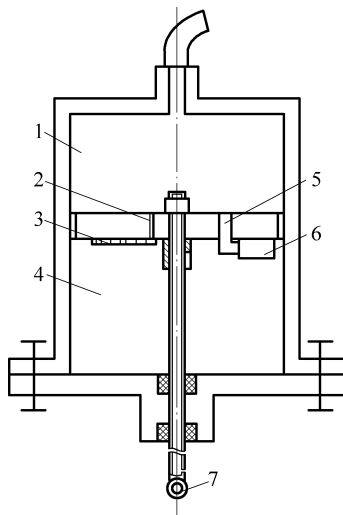


1—第二气室开关阀；2—第三气室；3—第三气室开关阀；4—第一气室；
5—塑料壳体；6—橡胶护套；7—第二气室；8—减振器。

图 2-3 保时捷三腔室空气悬架

(a) 实物图；(b) 结构图

图 2-4 所示是一种实现附加气室容积连续可调的结构,在附加气室腔体内设置可控制位置的活塞。当活塞静止时,附加气室有效容积腔 1 参与悬架的收缩,同时小孔通道 2 始终保持两腔气压平衡,确保控制阀 6 开启时不产生冲击,而细长管路 3 的壅塞、紊流现象产生的气阻使附加气室备用容积腔 4 不参与悬架振动;当活塞需要调节时,控制阀 6 打开,驱动装置驱动活塞运动,改变附加气室的有效容积^[10]。



1—附加气室有效容积腔；2—小孔通道；3—细长管路；4—附加气室备用容积腔；
5—大孔通道；6—控制阀；7—驱动机构连接端。

图 2-4 附加气室容积连续可调机构