Research
Mechanical Engineering—Review

道路车辆主动悬架系统研究进展

Min Yu^{a,*}, Simos A. Evangelou^b, Daniele Dini^a^a Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK^b Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 August 2022

Revised 1 March 2023

Accepted 1 June 2023

Available online 4 October 2023

关键词

主动悬架
车辆动力学
鲁棒控制
驾乘舒适性
底盘姿态

摘要

主动悬架系统(ASS)已被提出并发展了几十年,由于对驾驶舒适性和安全性的高要求,以及ASS与汽车电气化和自动化的兼容性,现在再次成为学术界和工业界的热门话题。现有的关于ASS的综述论文主要涉及动力学建模和鲁棒控制;然而,学术研究成果和工业应用要求之间的差距尚未弥合,阻碍了大多数ASS研究知识向汽车公司转移。本文回顾了道路车辆ASS的研究进展,重点介绍了硬件结构和控制策略。特别是,详细讨论了最近在量产汽车中采用的最先进的ASS,包括梅赛德斯主动车身控制(ABC)和奥迪预测主动悬架的代表性解决方案;还介绍了可能成为替代方案的新概念,包括串联主动可变几何悬架和主动车轮对准系统。结构紧凑、质量增量小、功耗低、频率响应高、经济成本可接受、可靠性高的ASS更容易被汽车制造商采用。在控制策略方面,未来ASS的发展不仅旨在稳定底盘姿态和减弱底盘振动,而且使ASS能够配合汽车内的其他模块(如转向和制动)和传感器(如摄像头),甚至在整个交通系统中进行高层决策(如参考驾驶速度),这些策略将与快速发展的电动汽车和自动驾驶汽车兼容。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. 引言

悬架系统通常配备螺旋弹簧和液压阻尼器,连接汽车底盘和负重轮,确保车辆安全和驾乘性能[1–14]。主动悬架系统(ASS)还引入了一个作用在簧载质量和非簧载质量之间的独立的力和扭矩作用,自20世纪50年代以来一直是一个长期的研究课题。然而,直到21世纪,ASS才开始被量产车(尤其是高档汽车)[15–16]所采用。它们的采用得益于多种因素的共同作用,包括:①机电驱动、微控制器和传感器[如惯性测量单元(IMU)]技术的成熟和良好的商业化;②对驾驶舒适性、稳定性和安全性的高

需求;以及③ASS与汽车电气化和自动驾驶的快速发展的兼容性。在行业中,汽车悬架市场预计将从2022年的 4.53×10^{10} 美元增长到2027年的 5.16×10^{10} 美元,这是由全球电动汽车(EV)销量快速增长推动的巨大需求,全球电动汽车销量从2018年的 1.3×10^6 辆增长到2021年的 4.3×10^6 辆。在学术界,关于主动悬架和控制主题的出版物总数在过去的20年里稳步增长,如图1所示。

大多数关于ASS的研究和综述论文都集中在车辆动力学、建模和鲁棒控制方面。然而,学术研究成果与工业应用要求之间的差距尚未得到弥合,因为汽车制造商需要的实用特性包括结构紧凑、质量增量小、低功耗、高频响

* Corresponding author.

应、可接受的经济成本和高可靠性。忽视这些因素可能会阻碍大多数 ASS 的研究知识从研究向产业转移。相比之下, 本文对 ASS 进行了全面的综述, 讨论了工业界和学术界的进展。特别是, 本文详细讨论了在过去 5 年里开发的最先进的硬件解决方案 (从元件到系统级别), 包括梅赛德斯主动车身控制 (ABC) 和奥迪预测主动悬架的代表性工业产品, 以及已经显示出有巨大潜力的可变几何悬架系统的新颖概念。它还报道了多目标 ASS 控制策略的进展, 旨在: ①提高驾乘舒适性和操控能力, ②在转向和制动机制的协同辅助下提高稳定性和安全性, ③提高燃油经济性, ④通过结合智能算法更好地适应各种驾驶场景。最后, 建议 ASS 未来的研究和发展方向: ①更兼容电动汽车和自动驾驶汽车及②追求更高的智能化。

本文的其余部分组织如下。第 2 节回顾了 ASSs 硬件元件的进展, 它们根据几何拓扑和功能进行了分类。还详细介绍了量产车中采用的 ASS 机电一体化系统, 以及最近提出的新颖概念。第 3 节报道了 ASS 控制方案, 这些方案经过综合, 主要实现: ①底盘姿态稳定的俯仰和侧倾角度, ②底盘振动减振以增强驾乘舒适性和抓地力, 及③与汽车中的其他模块协同操作, 以提高驾驶稳定性和安全性。第 4 节介绍了 ASS 研究中的其他主题, 包括数学模型、数值模拟和实验验证。在第 5 节中, 我们得出了关键的结论, 并给未来的研究提供建议。本研究提供的文献综述和研究愿景旨在指导下一代 ASS 的发展。

2. 最先进的悬挂元件和系统

本节根据几何拓扑和功能对 ASS 中的关键硬件元件进行分类, 然后回顾在量产车中使用或最近提出作为候选

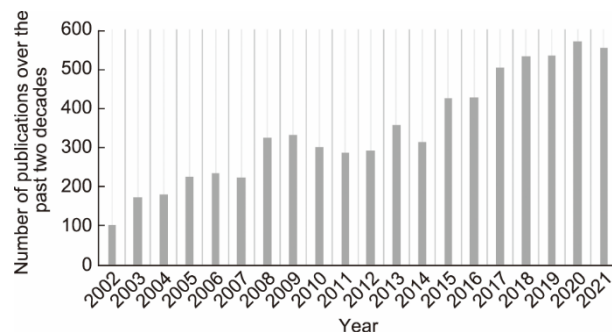


图 1. 在过去的 20 年里, 关于 ASS 主题的出版物数量 (来源: Web of Science)。

解决方案的最先进的 ASS 机电一体化系统。

2.1. 硬件元件

ASS 通常包含以下硬件元件: ①连接底盘和车轮的机械臂; ②补偿道路不平整并将悬架偏转限制在特定范围内的弹簧; ③耗散运动能量并减弱底盘振动的阻尼器; ④受控在弹簧质量和非弹簧质量之间施加独立力/力矩的主动部件。这些元件的不同形式已被开发和集成, 以建立各种 ASS, 促进底盘姿态调整、底盘振动减振以及提高车辆稳定性和减少空气阻力。根据几何拓扑和功能, 对 ASS 硬件元件的分类如图 2 所示。这些元件将在下面的小节中进一步详细介绍, 这可能会启发悬架研究人员对机电一体化系统结构新设计的想法。

2.1.1. 机械连接臂

一般来说, 现代汽车的独立悬架设计采用了三种不同的机械连接臂架构方案: 其中包括 Macpherson 支柱结构、双横臂悬架结构和多连杆悬架结构, 其运动学布局如图 3 所示。Macpherson 支柱结构[图 3 (a)]因其成本低、结构简单、易于维护和重量轻 (非簧载质量) 而成为市场主

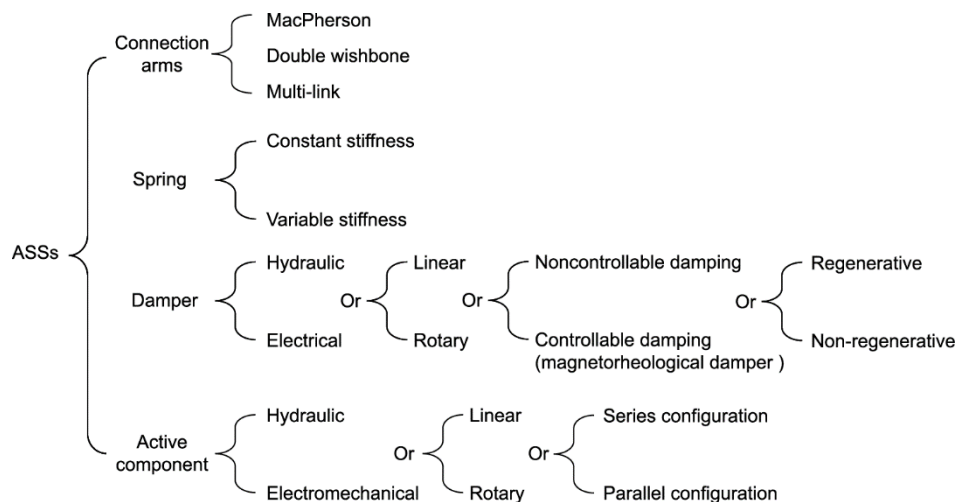


图 2. 根据几何特征和功能对 ASS 中的硬件元件进行分类。

导。然而，Macpherson 支柱结构会导致较大的外倾角变化（通常情况下，在支柱的静态平衡状态附近的负角，在悬架偏转的情况下在一个大的行驶距离上变成正角）和轮胎的侧向运动，从而降低抓地力和车辆稳定性[6]。

双横臂悬架结构[图3（b）]在道路上提供了更好的稳定性，连杆数量的增加和更灵活的设计（如臂长和关节位置）使轮胎有一个更大的接触面积[2]。多连杆悬挂[图3（c）]采用三个或更多的横向臂和一个或多个纵向臂，由于其优良的乘驾性和操控性，已开始应用于豪华跑车。然而，它需要复杂的几何设计[通常由多体仿真软件和三维（3D）设计辅助]，并且价格较高[12–13]。

最近提出了主动控制连接臂的概念，其中机电驱动集成到连接臂的一个或多个关节中，以调节车轮的外倾角、前束角和主稍后倾角，从而帮助轮胎正常运行和均匀磨损。典型的例子包括可变几何悬架系统和主动车轮定位系统（AWAS），如后面的第2.3节所述。

2.1.2. 悬架弹簧

悬架弹簧是连接底盘和车轮的关键部件，其主要目标是补偿道路的不平整性，限制悬架的偏转冲程，并确保路面和车轮轮胎之间有适当的接触力。如图4（a）所示，板簧是由级联弹簧组组成的最古老的悬挂弹簧类型之一。它们在乘用车上的使用在20世纪80年代就结束了，但在重型卡车上仍然很受欢迎。

恒定刚度的圆柱形螺旋弹簧主要用于汽车悬架系统，并且有几种不同的形式。非线性弹簧[图4（b）]适当地改

变线圈的形状，线圈直径在悬架弹簧的末端减小；因此，它们在较小的悬架挠度下表现出软特性，同时在显著的负荷传递下具有硬刚度[14]。可控刚度弹簧通常被称为空气弹簧，其结构如图4（c）所示，它使用压缩空气代替传统的钢弹簧，已被广泛应用于客车和公共汽车中。改变气压可以调整底盘高度，带来显著的优点：①“渡轮升降机”空气悬架高于正常乘驾高度，可以帮助客车上下渡轮，降低在陡峭坡道上搁浅的风险，也可用于崎岖地面或陡峭山顶；而②公共交通巴士采用的“跪地”功能，有助于降低巴士的台阶高度，方便乘客进出。空气弹簧已被进一步开发，并用于豪华轿车，以提高乘驾舒适性，弹簧刚度（即空气压力）通过电子控制，以适应不同水平的道路不平整度和驾驶场景（如第2.2节所述）。空气悬架系统的缺点包括由于过度磨损而造成的漏气和系统复杂性，因为这些系统引入了安全气囊、气动泵和阀门等附加部件。如图4（d）所示，在底盘中还配备了一个扭转杆，通过提高车辆的横向稳定性来辅助悬架结构，从而降低侧翻的风险。

2.1.3. 悬架阻尼器

悬架阻尼器旨在耗散运动能量，并减弱底盘的垂直振动。传统的液压减振器由于其低成本和易于维护，主导了汽车减振器市场；然而，它们的阻尼系数是不可控的，从而影响了其整体悬架性能。最近，磁流变阻尼器[18]已被开发和应用在一些汽车上，以提高乘坐舒适度（例如，MagneRide，由通用汽车公司开发，并于2002年首次应用

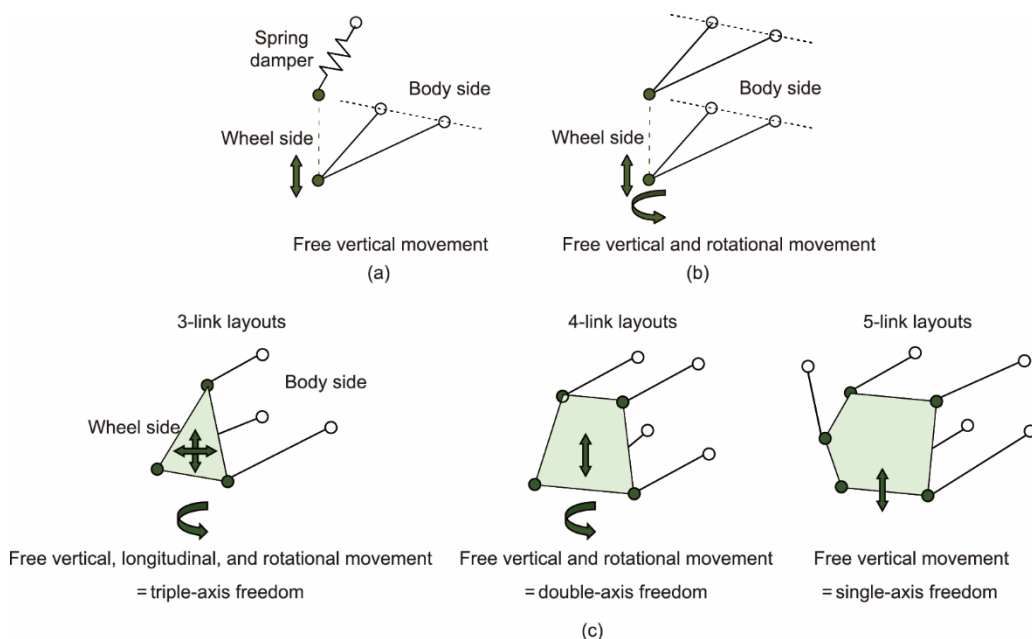


图3. 车辆悬架结构中连接臂的三种典型布置的运动学图。(a) Macpherson 支柱；(b) 双横臂；(c) 多连杆悬架结构[12]。

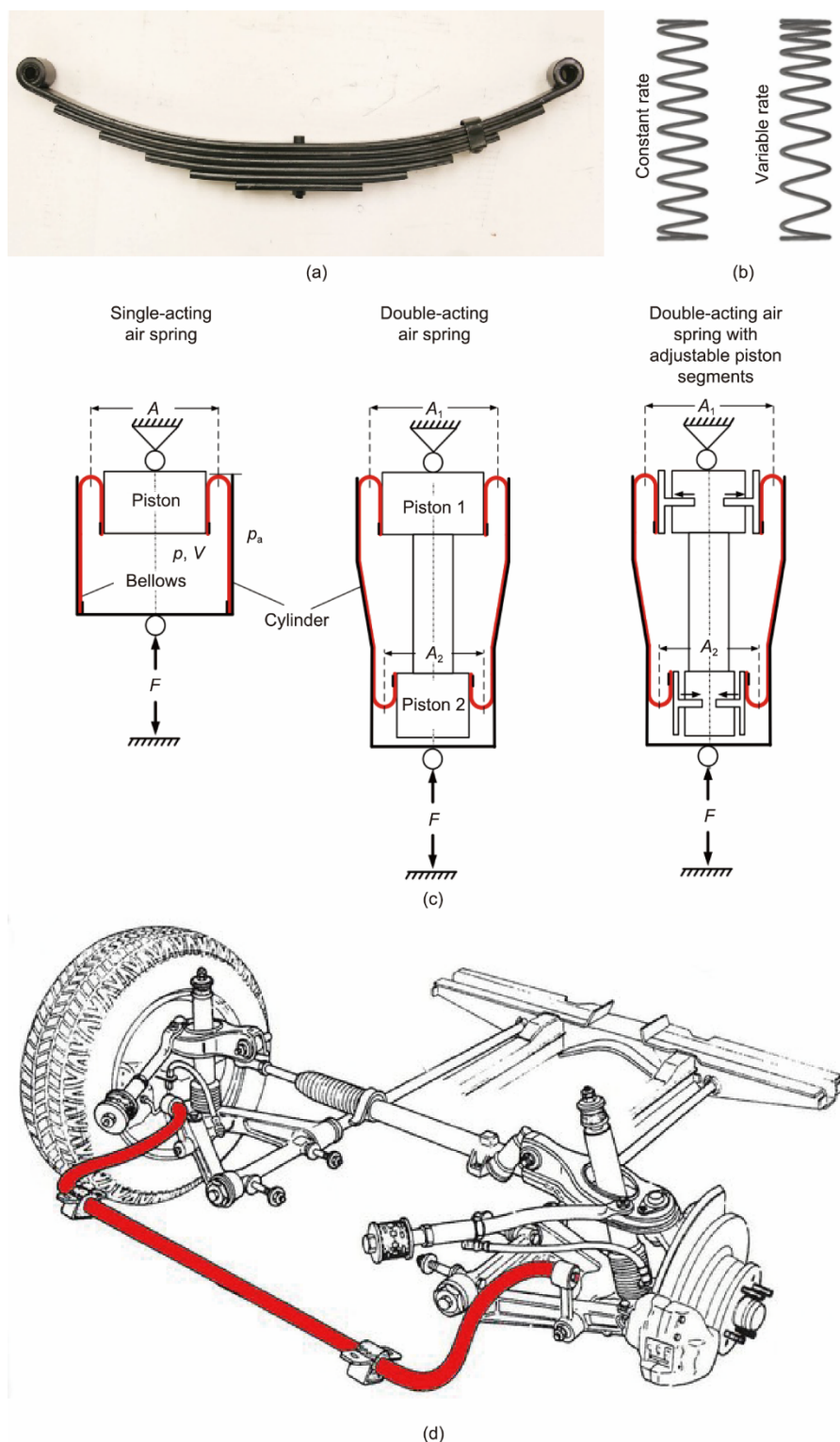


图4. 在车辆悬架系统中使用的四种类型的弹簧。(a) 板簧；(b) 具有恒定和可变速率的螺旋弹簧；(c) 三种空气弹簧：单作用空气弹簧、双作用空气弹簧和带可调活塞段的双作用空气弹簧[17]；(d) 扭转杆（红色突出显示）。图中所有缩写的定义都可以在所引用的参考文献中找到。

于凯迪拉克 STS [15])。带有磁流变阻尼器的车辆悬架系统，也被称为半主动悬架，稍后将在第2.2节中进行讨论。传统阻尼器的另一个缺点是能量以热的形式耗散和损失。根据参考文献[11]，悬架阻尼器耗散的车辆振动功率范围

为：客车 100~400 W，公共汽车和长途客车高达 2000 W。为了保存这种能量，最近开发了不同形式的再生阻尼器，用于能量收集（甚至是一个可控的阻尼系数）。下面将介绍三个具有代表性的再生阻尼器。

在参考文献[19]中提出并开发了一种具有能量收集和可调节阻尼系数的机电悬架阻尼器。如图5(a)所示,一种基于滚珠螺杆的机构,用于将平移运动转换为旋转,驱动三个由开关独立控制的发电机。其中一个发电机连接到一个可调节的电阻器来调整阻尼系数,而另外两个发电机则以恒定的阻尼系数再生电力。通过控制接通发电机的数量和调整电阻的值,可以适当地控制悬架阻尼系数,以适应不同的驾驶场景和路况。除了阻尼调节的能力,多个受控发电机可以输出高达30 W的合理电力。

我们提出了一种双腿运动机制,并集成在一个减振器中,以实现能量收集,如图5(b)所示[20]。在振幅和频率均在范围内连续变化的正弦激励输入条件下,对阻尼器的性能进行了评估,实验结果表明,阻尼系数可达 $1720 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。据报道,这种双腿运动机构的机械能转换效率在0.71~0.84之间,高于现有的电动阻尼器的机械传动解决方案,如滚珠螺杆和齿轮齿条。

电动阻尼器也已开始用于量产车;例如,奥迪开发了一种机电旋转阻尼系统原型,名为eROT,后来在2017年安装在奥迪A8中,显示了进一步应用的潜力[21]。eROT系统不仅具有可控的阻尼系数和高效的能量收集的特点,而且可以实现高度紧凑的结构。如图5(c)所示,后轴区域水平布置的电动马达取代了传统的减振器,使行李舱内有了额外的空间。据报道,eROT可以产生令人满意的电力,在测试期间平均发电量为100~150 W(从平坦路面的3 W到粗糙路面的613 W,相当于 CO_2 减排量高达 $3 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$)。

2.1.4. 活动组件

除了上述的连接臂、弹簧和阻尼器的硬件元件外,全主动悬架系统还引入了一个主动部件,该部件在簧载质量和非簧载质量之间独立地施加力或扭矩。为了在不同感兴趣的频率下实现底盘姿态稳定(例如,底盘调平)和车辆振动减弱,始终追求力或扭矩的快速响应(即宽频带宽)。关于驱动类型,已报道了机电驱动器(如2004年米其林轮内主动悬架[22]和2017年奥迪预测悬架系统[23])和液压驱动器(如2007年雪铁龙C5 II配备的液压主动悬架[24]),附录A中的表S1比较了ASS应用的优缺点。根据几何布局,ASS中的主动部件可分为串联(如串联主动可变几何悬架)或并联[如并联主动链悬架(PALS)],如第2.3节所述。

2.2. 量产车中的机电悬架系统

如第2.1节所述,将主动悬架的各个元件组合和集

成,以建立ASS的各种机电悬架系统(和半主动悬架系统)。下面将讨论在量产车中采用的最先进的ASS机电一体化解决方案。

2.2.1. 凯迪拉克MagneRide悬架

MagneRide [15]是一种典型的半主动悬架解决方案,由凯迪拉克在2002年首次推出。它的改进版本MagneRide 4.0 [图6(a)]于2020年和2021年在凯迪拉克的最新车型中被引入并实施,即CT4-V、CT5-V和CT5。在MagneRide悬架中,阻尼率和轮胎与路面的接触情况是由减振器内的磁流变流体控制。最新版本的MagneRide 4.0有以下亮点:①更新的轮毂加速度计和IMU传输道路干扰的速度比之前的版本快4倍;②在重制动、急转弯和其他驾驶条件下,IMU提供更准确的车身相对于车轮的运动读数;③通过补偿阻尼器流体温度的变化提供更一致的性能;④为了改善车身的控制,使用磁通控制,以实现回弹与压缩之间更一致和准确的转换;⑤阻尼器摩擦的显著减少使其接近“无阻尼”效果,从而最大限度地减少了不同驱动模式之间的差异。

其他具有代表性的半主动悬架包括Öhlins半主动悬架[25]和Tenneco提供的Monroe智能悬架[26-27]。与MagneRide类似,两者都通过电气控制单元来调整减振器的阻尼系数,以适应各种路况,提高驾乘性能。然而,与全主动悬架相比,半主动悬架不能通过俯仰角、侧倾角和底盘高度来控制底盘的姿态。附录A中的表S2总结了半主动悬架和主动悬架之间的比较。

2.2.2. 米其林轮内主动悬架

米其林在1996年首次提出了主动车轮概念[22]。米其林轮内主动悬架[图6(b)]有两个电机集成在一个车轮内。一个负责旋转车轮并将动力传递到地面,而另一个负责驱动主动悬架系统,有助于提高舒适性、操控性和整体车辆稳定性。该系统是专门为电动汽车(EV)开发的,因此它不需要变速箱、离合器、传动轴或防倾杆。所有的制动、驱动和悬架部件都安装在一个车轮内。与主动差速器系统的优点相似,主动轮技术比轴驱动汽车具有更好的操控能力。此外,由于车辆前部不需要传统的发动机,因此这个空间可以专门用于吸收冲击。然而,冲击、水和雪对这种“轮内”设计的影响尚未得到充分的研究。该项目于2014年中断,因为重量增量、车轮内需要的空间和经济成本都是不可接受的[28]。

2.2.3. 电控空气悬架

与负载成比例偏转的机械弹簧系统不同,空气弹簧的

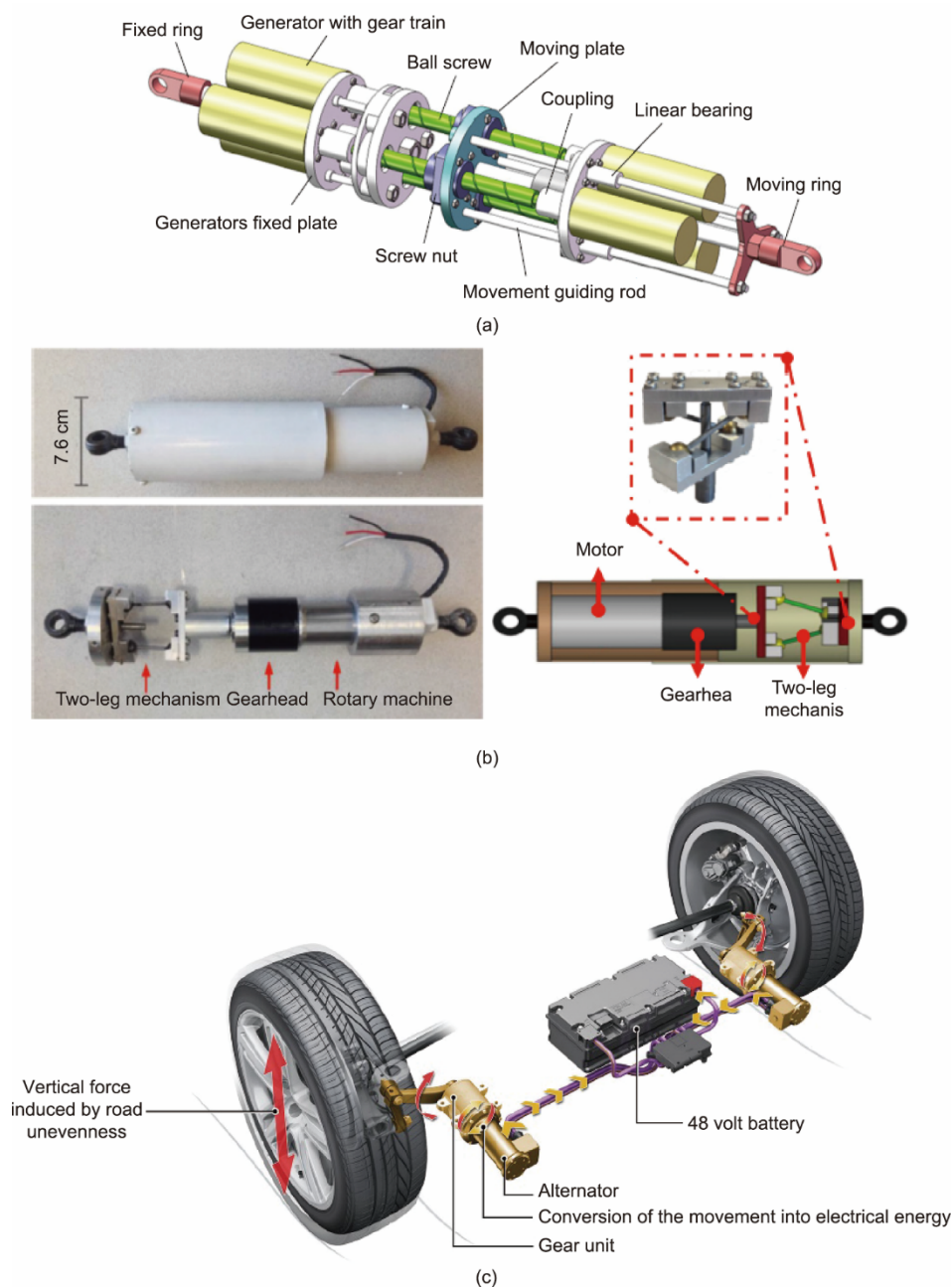


图5. 具有能量收集功能的不同形式的悬架阻尼器。(a) 基于滚珠螺杆的多控发电机[19]; (b) 双腿机构[20]; (c) 奥迪机电旋转阻尼器, 称为eROT [21]。

高度可以通过调整弹簧压力来独立于负载进行调整。电控空气悬架 (ECAS) 由 Dunlop 系统和组件有限公司 (Coventry, 英国) 开发, 在 1993 年首次安装在路虎 Rover Classic, 后来安装在路虎 Rover P38A [29]。底盘高度是自动控制的, 以适应驾驶条件, 同时也提供了一个手动驾驶高度开关。ECAS 已被广泛应用于高端豪华轿车 (GT), 如梅赛德斯-奔驰 AIRMATIC [30][图 6 (c)]、福特 Expedition 车型 [31]、特斯拉 Model S [32] 和奥迪 A8 AI 悬架 [图 6 (e)] [23]。

2.2.4. 梅赛德斯主动车身控制

梅赛德斯 ABC [图 6 (d)] 是由梅赛德斯-奔驰设计的全主动液压悬架, 于 1999 年进入批量生产 [33]。ABC 系统能够独立地控制每个车轮上的弹簧和阻尼力, 以最小化滚动、俯仰和垂直运动。此外, 底盘可以主动提升以增加离地间隙或在特殊场合根据情况降低底盘。后来在 2013 年, 梅赛德斯-奔驰 S 级 (W222) 中增加了路面扫描功能, 可以在高达 $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的行驶速度下对车辆前方 15 m 的路面做出响应 [34]。通过与空气悬架技术的进一步结

合, 提供了更好的乘驾舒适性和操控能力。

2.2.5. 奥迪预测主动悬架

奥迪在2017年为其旗舰车型奥迪A8推出了一项高科技创新成果[32]: 预测主动悬架, 这是一种全主动悬架系统, 由双横臂、空气弹簧、旋转电动阻尼器和机电执行器组成。这些元件及其构型如图6(e)所示。机电执行器独立地提高或降低每个车轮, 主动控制底盘高度(最大增量为85 mm), 从而减少空气阻力。每100 km可节省高达0.7 L燃油。此外, 奥迪A8预测主动悬架提供了“动态”和“舒适+”两种驾驶模式: 在“动态”模式, 奥迪A8在横向加速度为1g的情况下急转弯时底盘的倾斜角度只有2°的变化, 而采用被动悬架时则超过5°。相比之下, “舒适性”模式最小化了底盘的振动加速度。在两种驾驶模式下, 车辆滚动力矩是最优分布, 以最大限度减少加速或制动时的“俯冲”感觉。奥迪预测式主动悬架的平均功耗为10~200 W, 明显低于液压悬架解决方案。

2.2.6. ZF的“飞毯”预测底盘概念

2019年, ZF开发了一种名为“飞毯”[35~36]的新底盘概念车——这是一种能够进行低频底盘姿态控制的电液主动悬架系统。更重要的是, ZE的“飞毯”将悬架控制与转向和制动系统连接起来, 以提供更舒适的乘驾体验。该底盘概念还具有道路预览控制功能, 可最大限度地减少减速带等对乘驾舒适性的影响。

2.2.7. Bose电磁主动悬架

自Bose首次展示电磁悬挂系统已经过去几十年了, 该系统可以以低驾驶速度完美地平整车辆底盘, 无论道路如何颠簸。最近, Bose设计了一种新型管状永磁电磁执行器[图6(f)], 以取代底盘每个角落的传统弹簧阻尼器单元[22]。该执行器的特点是: ①直接驱动, 占用体积小; ②与其他全主动系统相比, 具有更高的频率带宽; ③比需要连续液压增压的电液系统的功耗低。

2.3. 新概念

2.3.1. 可变几何悬架系统

可变几何悬架系统是一种改善抓地力的新方案[39~42]。系统的控制操纵器是每个车轮的外倾角, 由液压缸驱动[图7(a)]。车轮外倾角角度的变化将影响车辆的横摆率, 从而减少相对于参考横摆率的跟踪误差。此外, 通过控制每个车轮的外倾角, 可以主动修改侧倾中心和半轨道的高度, 从而提高车辆的行驶性能, 如轨迹跟踪和横向稳定性。

2.3.2. 串联主动可变几何悬架

串联主动可变几何悬架(SAVGS)已在参考文献中被概念化[43~48], 并且被认为特别适合具有刚性悬架弹簧和轻型车辆底盘的GT汽车。图7(b)显示了SAVGS应用于双横臂悬架的原理图, 其中在弹簧阻尼器(E-F)和底盘之间引入了单连杆(F-G)的主动部件。单连杆相对于枢轴关节“G”的旋转在 $\angle\theta_{SL} \in [0, 180]^\circ$ 的范围内工作, 其中 $\angle\theta_{SL}$ 被定义为 $\angle\theta_{SL} = \angle\theta_{SL}^{(se)} - \angle\theta_{SL}$ ($\angle\theta_{SL}^{(se)}$ 是静态平衡状态下的单个连杆角)。因此, 如果假设车轮固定, $\angle\theta_{SL}=0^\circ$ (对应于静力平衡位置)时底盘高度最低, 而 $\angle\theta_{SL}=180^\circ$ 时表示底盘上升量最大。此外, 弹簧阻尼力和垂直胎压的变化对单个连杆在标称平衡状态($\angle\theta_{SL}=90^\circ$)附近的旋转最为敏感。SAVGS的主要特点包括:

- 低频底盘姿态控制: 例如, 当运动型多用途车(SUV)的横向加速度(a_y)高达 $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以及GT的横向加速度(a_y)高达 $5.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 时, SAVGS能够完全消除底盘的侧倾角变化。
- 高频底盘在侧倾、俯仰和垂直加速度方面的振动减弱, 提高了在高不平路面上的乘驾舒适性和操控能力。
- 引入的主动部件(即单连杆)的惯性较小, 预计簧下质量的增量可以忽略不计, 并且连杆运动的频率响应较高。
- 故障安全, 因为如果单连杆执行器断电甚至发生故障, SAVGS系统可以切换回原来的被动悬架。

2.3.3. 并联主动连杆悬架

另一种连杆驱动的机电悬架——PALS——已经在概念上提出, 并在四分之一车演示设备中实际实施[49~51], 初步测试结果显示了良好的潜力。如图7(b)所示, 与弹簧阻尼器并联地引入了一个摇杆-推杆组件(K-J-F)。摇臂(K-J)的主动元件由旋转执行器驱动, 从底盘扭矩传递至下横臂, 从而提高悬架性能。与被动悬架相比, PALS在其感兴趣的频率上具有底盘姿态稳定性、乘驾舒适性和抓地力改善的特点。PALS具有与SAVGS相似的功能, 但它被认为更适合用于具有软悬架弹簧的重型汽车, 如SUV[52~54]。

2.3.4. DOFTEK AWAS

DOFTEK AWAS已经开发了两年的时间, 目的是使汽车能够调整三个对准方向: 外倾角、前束角和后倾角[见图7(c)中的配置][55~56]。AWAS可以安装在任何类型的悬架设计上, 包括MacPherson支柱、双横臂悬架、多连杆悬架、后轮转向车辆、商用卡车和拖车车轮。它可以最大限度地

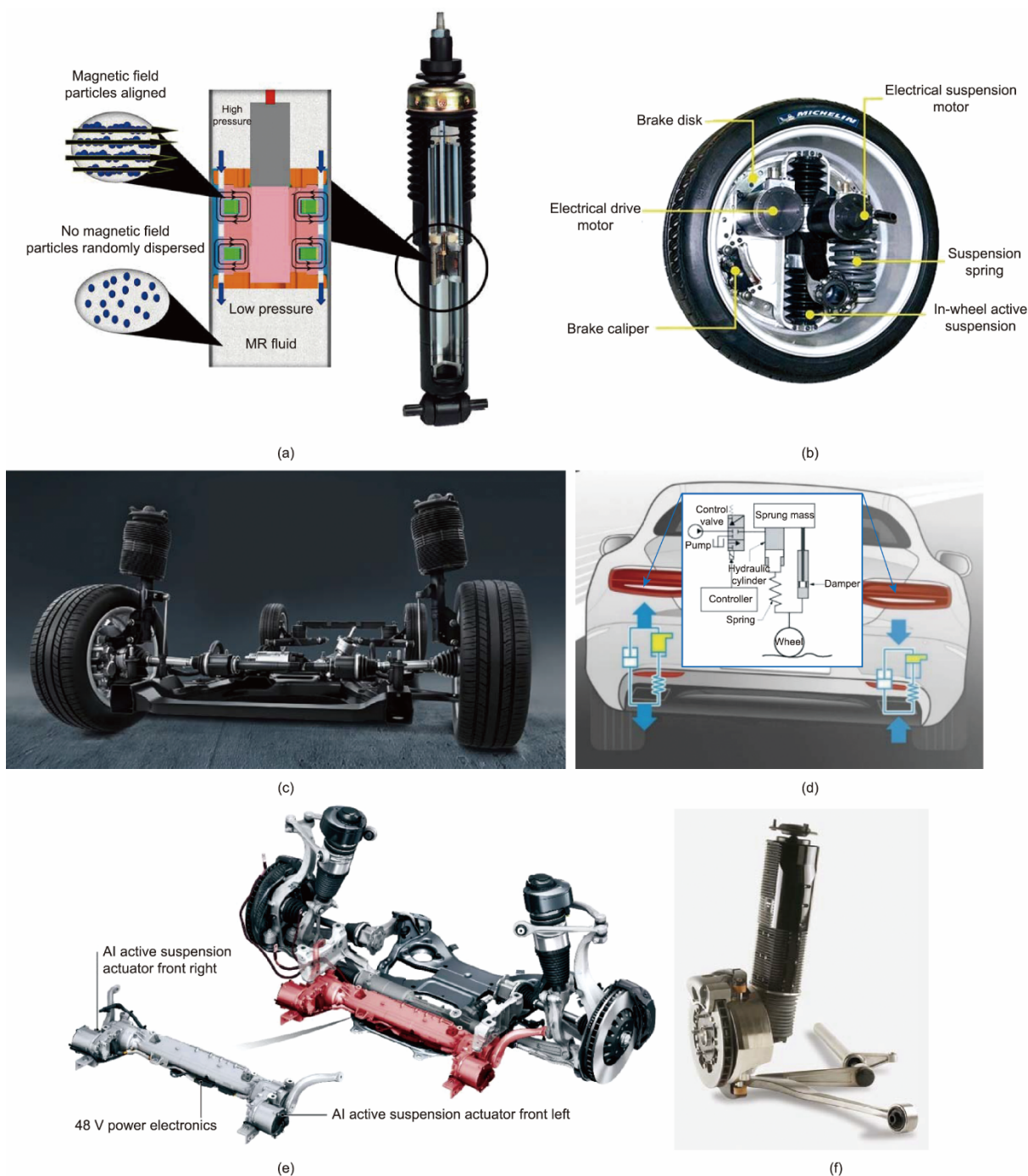


图6. 商用车所采用的最先进的ASS机电一体化解决方案。(a) 凯迪拉克MagneRide, 典型的半主动悬架系统[15-16]; (b) 米其林车轮主动悬架[22]; (c) 梅赛德斯-奔驰AIRMATIC悬架[30]; (d) 梅赛德斯-奔驰ABC, 一种电动液压悬架[33]; (e) 奥迪A8预测主动悬架, 配备旋转电动执行器(红色突出显示), 空气悬架, 道路预览摄像头[23]; (f) Bose电磁主动悬架[37-38]。AI: 人工智能。

减少滚动阻力, 以节省燃料, 增加电动汽车的续航里程, 减少轮胎磨损, 并降低轮胎温度。AWAS由两个机电设备组成, 一个安装在原始设备制造商(OEM)悬架支架上, 用于主稍后倾角和外倾角调整, 另一个安装在横拉杆上, 用于前束角调整。这两种调整都是由一个DOFTEK控制单元来控制的。AWAS对整个车辆引入的重量增量约为4 kg。AWAS最初应用在奥迪TTRS和梅赛德斯-AMG GT

S上。

2.4. 成本、重量和空间要求

不同类别的汽车可能对ASS在成本、重量和空间方面有不同的要求。例如, 高端豪华车可以接受更高的经济成本, 而SUV可以比GT车承受更多的ASS重量增加。将反映ASS成本和重量增量的现有数据总结如下。

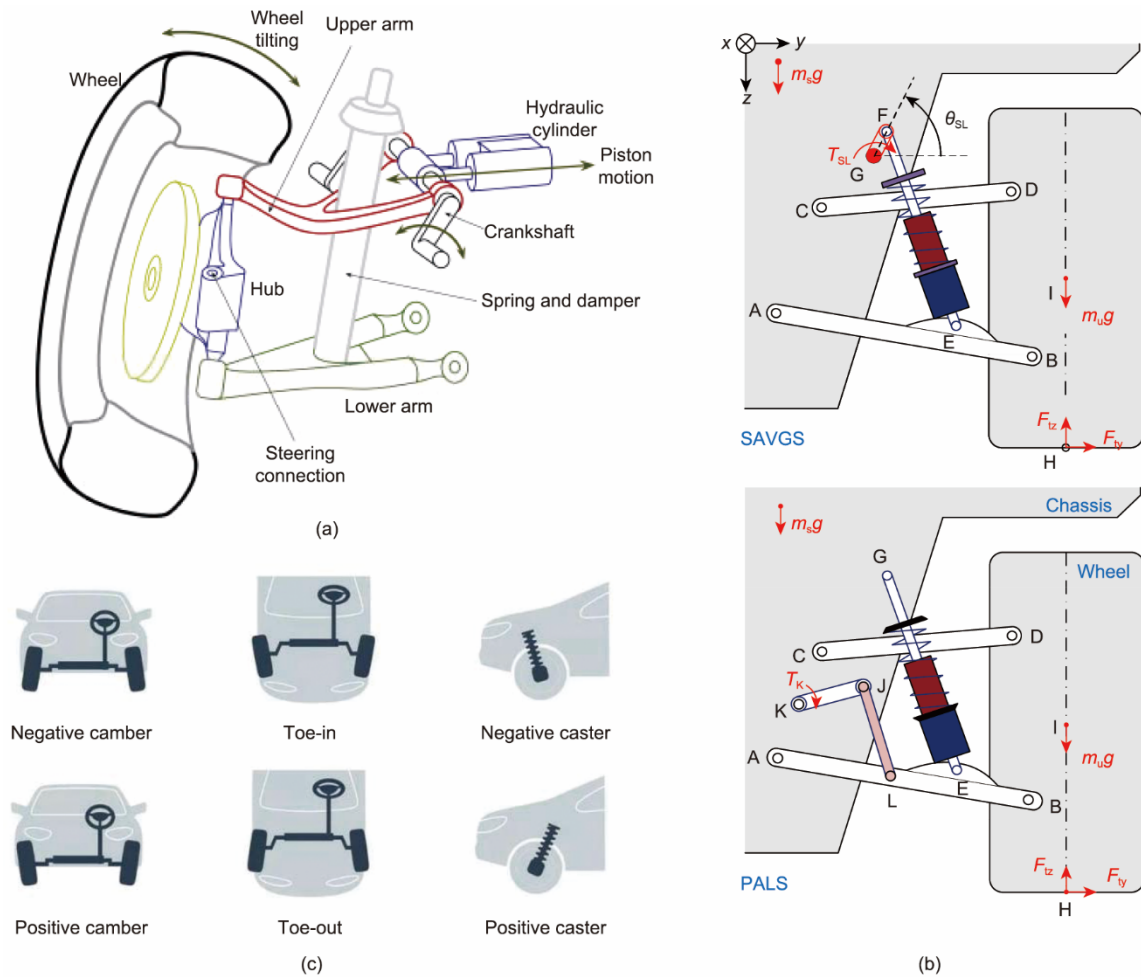


图7. 可变几何悬架系统的各种概念。(a) 液压缸驱动的可变几何悬架系统，主动控制上臂关节，从而控制负重轮的外倾角[42]；(b) 两个基于连杆的机电悬架-串联主动可变几何悬架（SAVGS；在文献[43–44]中提出，其中扭矩由旋转电机提供并作用于单链F-G），主动控制弹簧阻尼器的方向和压缩/延伸，从而控制垂直胎压，以及并联主动连杆悬架（PALS；在参考文献中提出[49]），主动控制施加在摇杆推杆组件K-J-L上的扭矩；(c) 由AWAS调整的三轮对准图，其中从左到右显示外倾角、前束角和后倾角[55–56]。图中所有缩写的定义都可以在所引用的参考文献中找到。

就全尺寸汽车中ASS的重量增加而言，Bose代表解释了2030年将量产车中的悬架推向市场所需的条件：对于高端汽车来说，成本必须降到合理水平，每个车轮悬架的重量增加必须控制在不超过现有悬架重量的50 lb (22.7 kg) 的范围内。因此，一辆量产车将额外增重200 lb (90.7 kg) [37]。据报道，最近开发的基于马自达MX5的SAVGS原型机预计引入了约37.7 kg的重量增量[51]，而DOFTEK [55]开发的新型AWAS只引入了4 kg的重量增量。

在经济成本方面，据报道，保时捷的主动悬架管理系统根据车型定价：718 Boxster和Cayman的价格约为1000 GBP，Cayenne的价格类似，但Macan约为800 GBP。保时捷两款SUV的系统也可以配置空气悬架套件，Macan上的价格约1900 GBP，Cayenne上的价格约2600 GBP [57]。奥迪A8提供了可选的预测主动悬架，售价约为5450 EUR (4700 GBP)。SAVGS整车实验原型车

的成本为8827 GBP（含现成组件），但在量产车的应用中，这一成本有望大幅降低[51]。

在空间占用方面，由于前轴上没有内燃机，电动汽车比燃油汽车提供了更多的空间来部署ASS。

2.5. 主动悬架硬件结构总结

现代ASS不仅引入了在簧载质量和非簧载质量之间主动施加力和扭矩的元件，而且还包含了每个硬件元件的进步：从传统的Macpherson/双横臂结构到多连杆连接臂；从传统的螺旋弹簧到空气弹簧，其压力可以通过主动电子调节，从而使弹簧刚度可控；从传统的液压阻尼器到电动旋转阻尼器，其中可以实现可调阻尼和能量收集。

除了提高悬架性能外，在ASS的机电结构中始终追求重量增量小、占用空间真实、频率响应高、经济成本低、能耗低等特点，使ASS更实际可行，因此更有可能被汽车制造商采用[58–72]。在这些最先进的ASS解决方

案中, 奥迪预测主动悬架和梅赛德斯ABC是两个具有代表性的例子。在学术界, SAVGS和PALS的两种基于连杆的机电一体化悬架最近已经被提出并经过实验验证, 显示出了低惯性、快速响应、可忽略的非簧载质量增量和故障安全特性的潜力。

3. 控制策略

本节对ASS的一般控制目标和要求进行了分类和说明。这些包括: 在较低频率下稳定底盘姿态, 以实现理想的车辆动力学, 如在转弯时将侧倾角归零, 提升底盘以保持离地间隙, 调整俯仰角以减少空气阻力等; 人类可感知的更高频率的车辆振动减弱(例如, 底盘垂直加速度为4~8 Hz, 滚动和俯仰加速度为1~2 Hz); 以及对在更高频率(大于15 Hz)下的控制工作进行惩罚, 以减少ASS驱动(在感兴趣的频率之外)的不必要的能量消耗。

除了上述基本的控制目标外, 还采用了更“智能”的ASS控制策略, 同时实现多种功能, 并切换控制焦点以适应不同的驾驶情况。例如, ASS可能专注于在联网和自动交通系统和赛车等应用中减少空气阻力和节约能源, 或者, 它可能会专注于改善在崎岖路面上的家庭驾驶旅程的驾乘舒适性和抓地力。

此外, 必须考虑和保证ASS控制的鲁棒性, 以处理车辆的不确定性, 如: ①受乘客数量影响的可变有效载荷; ②由悬架压缩/扩展率确定的可变阻尼系数; ③受载荷影响的ASS中执行器输出的动态特性。

3.1. 底盘姿态稳定

对于底盘姿态稳定方面, 比例积分导数(PID)算法仍然是最常用的控制算法, 尽管它已经进一步与智能算法(模糊逻辑、神经网络等)相结合, 以调整控制调优参数, 从而更好地处理各种路况[73]。据报道, 用于滑模控制和后推控制的非线性控制算法也可以稳定底盘高度。

3.1.1. 比例积分导数控制

虽然已经提出了许多先进的控制算法用于运动跟踪, 但在工业上仍然主要采用PID控制, 因为它简单而有效, 并且不需要模型[74]。对于ASS应用, 针对最近提出的基于连杆的SAVGS机电悬架提出了多目标PID控制方案, 以实现不同形式的底盘姿态稳定, 包括: ①提升运动, ②侧倾角, ③俯仰角, ④倾覆力偶分布(OCD; 前后轴之间)[45]。总体配置如图8所示。在底盘的左前角($i=1$), $C_{11}, C_{21}, \dots, C_{N1}$ 是一组PID控制器, 它们分别处理上

述四个目标。 $C_{11} \sim C_{N1}$ 的PID的增益由一个更高的逻辑控制器进行调整和更新, 以适应不同的驾驶情况, 并旨在改善车辆的动力学。图中, $s_{11}, s_{21}, \dots, s_{N1}$ 是对PID控制器的测量反馈。控制输出 $\Delta\theta_{SL1}^{(0)*} - \Delta\theta_{SL1}^{(N)*}$ 在SAVGS系统的左前角形成单个连杆的整体角参考位置, 并遵守角度限制。总体而言, 每个角落的单连杆协调调整底盘姿态。该多目标PID控制方案可推广到其他ASS中。

3.1.2. 滑模控制

滑模控制旨在帮助开发一个可变结构的控制器, 它驱动系统移动到一个设计的滑动表面的附近, 然后约束系统沿着该表面滑动。在参考文献[75–76]中, 是一种基于滑模控制的非线性控制器, 用于空气悬架系统, 以调整车辆簧载质量的高度(高度控制)和调节车身的侧倾角和俯仰角(调平控制)。通过克服悬架系统中的非线性和不确定性, 提高了跟踪精度和鲁棒性。此外, 还设计了一个滑模观测器来估计四个空气弹簧内部的压力。

3.1.3. 后推控制

后推控制方法是一种递归设计方法, 它将控制Lyapunov函数的选择与反馈控制器的设计联系起来, 并保证了严格反馈系统的全局渐近稳定性。提出了一种自适应后推控制策略, 以在参数不确定的情况下稳定底盘姿态[77], 其悬架偏转、垂直胎压增量和执行器饱和度被认为是“硬约束”, 并确保在其允许范围内。

3.2. 底盘振动减弱

除了底盘姿态稳定, 如第3.1节所述, 底盘振动减弱是ASS的另一个显著特点, 提高了驾乘舒适性和抓地力性能。开发了一组控制策略, 以最大限度减少道路不平整干扰到底盘振动的传播, 包括Skyhook控制(用于半ASS)、线性二次调节器(LQR)和线性二次高斯(LQG)、 H_∞/H_2 控制、 μ -合成控制、滑模控制、后推控制等。最近, 这些经典的方法进一步与智能控制相结合, 如模糊逻辑[78–90]、神经网络[91]、遗传算法和数据驱动控制系统[92]的新兴技术, 从而实现了自适应控制能够更好地应对不同的路况和驾驶场景。

3.2.1. Skyhook控制

Skyhook控制已被半ASS广泛采用, 以提高乘坐舒适度。在这种策略中, 受控的力产生元件模拟了一个连接底盘和惯性参考(或虚拟天空)的阻尼器[93–94]。这个阻尼器限制了簧载质量的运动, 从而减少了由外部扰动引起的振动。Skyhook控制是半主动悬架控制设计的一种基本

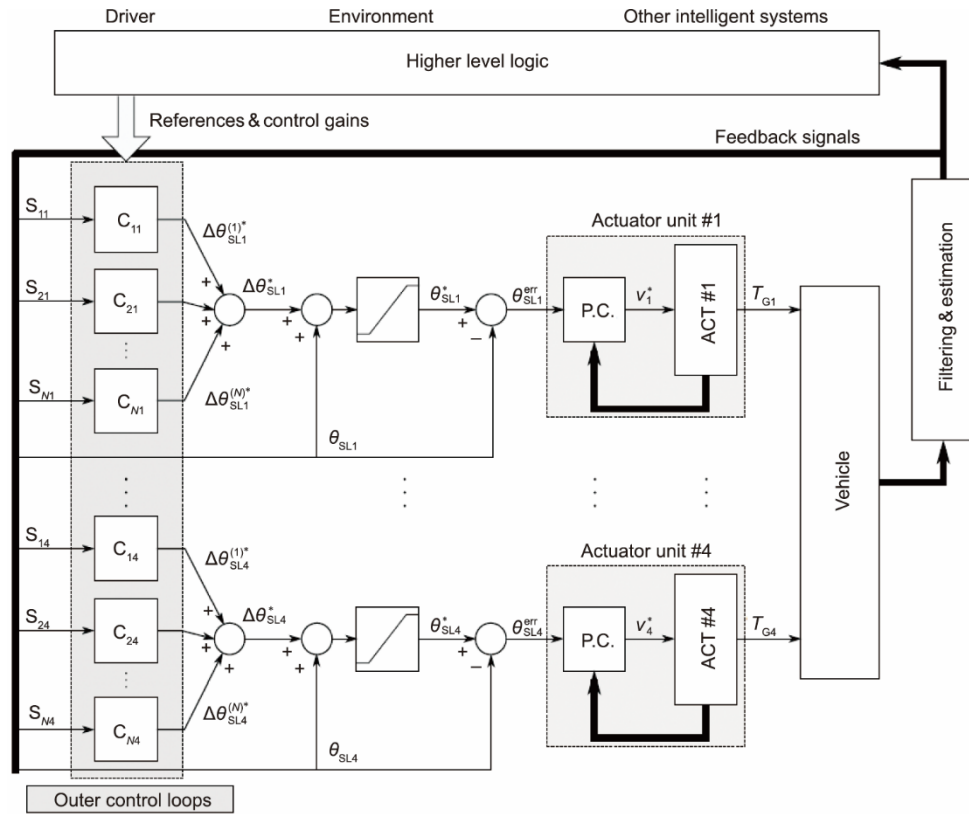


图8. 一种用于底盘姿态稳定的通用多目标PID控制方案[45]。这个例子显示了最近提出的基于链路的SVAGS机电一体化悬架[43–44]，其中， $\Delta\theta_{SL1}$ 是SVAGS中单连杆的主动控制角位置。图中所有缩写的定义都可以在所引用的参考文献中找到。

方法。但是，它没有考虑簧载下质量振动，而这种振动会直接影响抓地力质量。

随后提出了Ground-hook控制，其中，在地面和非簧载质量之间增加了一个虚拟阻尼器[95]。该策略旨在减少垂直胎压的变化，从而提高抓地力；它特别适用于重型车辆。Skyhook和Ground-hook控制可以结合起来，以提高乘驾的舒适性和被动悬架的抓地力。此外，Skyhook控制最近进一步发展，以整合自适应控制的概念，阻尼操纵变量是可调节的，因此它可以调整为一个适当值，以适应道路情况[95–97]。

3.2.2. LQG和LQR

LQR和LQG都被用于解决最优控制问题，其目标是找到一个控制器，在线性系统动力学的影响下最小化二次代价函数。当LQR和LQG框架应用于带有ASS的线性四分之一车或半车模型时，乘驾舒适性和抓地力的悬架性能目标，以及控制操纵变量的能源成本，通过二次指数来表示[98–99]。添加和调整适当的矩阵，以权衡不同目标变量的重要性。然而，LQR和LQG都基于手工导出的线性模型进行主动悬架最优控制，忽略了车辆系统的非线性和不确定性；因此，实际的车辆应用并没有表现出像线性分

析所表明的那样有希望的性能提高。

最优控制技术可以很好地适应ASS，旨在减少道路不平整和负载传递的干扰带来的增益，从而改善与底盘振动相关的目标变量。LQG和LQR是典型的最优控制技术，特别适用于具有ASS的线性四分之一车模型。

3.2.3. H-∞/H2控制

H-∞方法由于其鲁棒性已广泛应用于线性多输入和多输出（MIMO）系统[100]。这种控制技术旨在最小化外源干扰对系统性能目标的传播。在数学上，H-∞控制器的目标是根据H-∞范数的定义，找到一个最小化线性分数阶变换 $F_l(\hat{P}, \hat{K})$ 的最优控制器 $\hat{K}$ ：

$$\|F_l(\hat{P}, \hat{K})\|_{\infty} = \sup \bar{\sigma}(F_l(\hat{P}, \hat{K})(j\omega)) \quad (1)$$

式中， $\hat{P}$ 为系统对象； $\bar{\sigma}$ 为矩阵的最大奇异值 $F_l(\hat{P}, \hat{K})(j\omega)$ ；“sup”为最小上界。相反，H2控制反而最小化了MIMO系统的H2范数，其定义如下：

$$\|F_l(\hat{P}, \hat{K})\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{trace}\{F_l^T(\hat{P}, \hat{K})(j\omega) \cdot F_l(\hat{P}, \hat{K})(j\omega)\} d\omega} \quad (2)$$

H- ∞ 控制已广泛应用于ASS,通过最小化道路不平整对性能目标的干扰,如垂直底盘加速度、垂直胎压增加等,以提高乘驾舒适性和抓地力[48–51,101–102]。

3.2.4. μ 合成控制

μ 合成技术扩展了H- ∞ 合成的方法,为具有结构不确定性的系统对象设计了鲁棒控制器。在ASS中,主要的不确定性包括:①受乘客数量影响的可变有效载荷;②由悬架压/扩展率决定的可变阻尼系数;和③受驱动负荷影响的ASS中执行器输出动态[53]。通过设置这些不确定性的范围, μ 合成可以按照H- ∞ 方法的类似控制框架进行。

3.2.5. 模型预测控制

另一种广泛应用于ASS的鲁棒控制算法是模型预测控制(MPC),其通过迭代计算和优化来容忍参数的不确定性,以确保系统的鲁棒性[103–104]。系统动力学的线性或非线性模型也可以迭代更新,从而进行精确构建[103]。在道路预览技术(由摄像机支持)的进一步帮助下,MPC可以将前方道路轮廓的变化作为已知的输入干扰,从而为ASS控制提供强大的解决方案,因为MPC可以计算出控制范围上的控制操作变量的最优序列[105]。

3.2.6. 滑模控制

除了将滑模控制应用于底盘姿态稳定外,该算法是一种有效的鲁棒控制方法,可以减弱底盘振动,从而提高乘驾舒适性,Utkin于1977年发表了有关该主题的第一篇论文[106]。在参考文献[107]中,提出了一种针对基于半主动悬架和磁流变阻尼器的四分之一车滑模控制策略。在考虑车辆有效载荷的不确定性的同时,采用理想的Skyhook悬架作为控制参考模型,在保证控制的鲁棒性的同时,显示出良好的乘驾舒适性增强。在主动悬架系统中也有类似的应用,显示出令人满意的悬架性能和控制鲁棒性,参数的不确定性和系统约束都纳入了考虑当中[108–109]。

3.2.7. 后推控制

后推控制可用于稳定底盘姿态,如3.1节所述;被提出并应用于半主动及ASS的四分之一、半车和全车模型,通过减弱底盘振动提高乘驾舒适性,同时保证系统稳定性和鲁棒性[77,110–112]。

3.3. 协同控制策略

由于硬件(传感器、驱动器等)的发展以及车辆电气化和自动驾驶的趋势,现代ASS控制策略不会单独对底盘姿态稳定或减弱振动进行开发,而是与悬架中的①其他元件(如电阻尼器)协同操作,以提高乘驾舒适性和能量

收集[63];②车辆中的其他模块,如转向系统[113–115]、防抱死制动系统(ABS)[116]以及高级驾驶辅助系统(ADAS)中的电子稳定控制系统(ESC)[117],需要进一步提高车辆的安全和稳定性;以及③在运输系统中更高层的决策。例如,可以进一步优化CAV的行驶速度曲线,以减少空气阻力,从而节省整个运输系统的能量,因为空气阻力由底盘高度、行驶速度、参考车辆之间的距离等决定。较高的行驶速度通常会由于空气阻力而导致更多的能耗。然而,ASS可实现底盘升降和俯仰控制的灵活性,从而减小CAV的行驶。下面选择了几种ASS协同控制策略。

3.3.1. 以实现底盘姿态稳定和减振的协同控制

在最近提出的基于连杆的PALS[49]机电一体化悬架的控制策略开发中,提出了一种与频率相关的多目标控制算法,以实现同步低频底盘姿态信号跟踪及其感兴趣频率的高频底盘振动减弱[52]。如图9所示,采用多目标PID控制器作为外环控制器,使车辆底盘稳定在理想的姿态,采用H- ∞ 控制器(K)作为内环控制器,以最小化由道路不平整引起的扰动对乘驾舒适性和抓地力目标的影响。重要的是,进一步增加了能够有效连接外环PID控制器和内环H- ∞ 控制器的自由积分器(记为M),以确保底盘姿态参考信号的零跟踪误差(底盘调平如图9所示)。数值模拟提供了良好的结果,尽管与单独的底盘姿态控制器或振动衰减控制器相比,性能会受到影响。这种频率相关的多目标控制算法是现实的,因为在实践中需要主动悬架来实现这两个功能。

3.3.2. 乘驾的舒适性和能量收集的协同控制

与ASS协同控制策略的另一个例子是使用基于直流电机的悬架同时实现提高乘驾舒适性和能量收集的目标[118]。这种控制策略可以实现两种操作模式:提升乘驾舒适度的主动控制和促进能量收集的能量再生控制。针对主回路控制器的设计,研究了基于全车悬架模型的主动悬架的H- ∞ 鲁棒控制问题。采用限制H- ∞ 控制器作为主控制器来实现能量再生,该控制器是所提出的H- ∞ 控制器和将电机限制在能量再生工作区域的限制策略的组合。

3.3.3. 主动悬架和转向系统的协同控制

协同控制不仅协调主动悬架内部的各个元件,还与汽车中的其他模块协作,如转向、制动、驾驶辅助系统,以进一步改善车辆的纵向和横向控制,从而提高乘驾的稳定性和安全性。轮内电机的协同在最近提出的可变几何悬架系统中得到证明[39],并设计了一个独立转向系统的扭矩来提高悬架性能和横向动力学[114]。如图10所示,该协

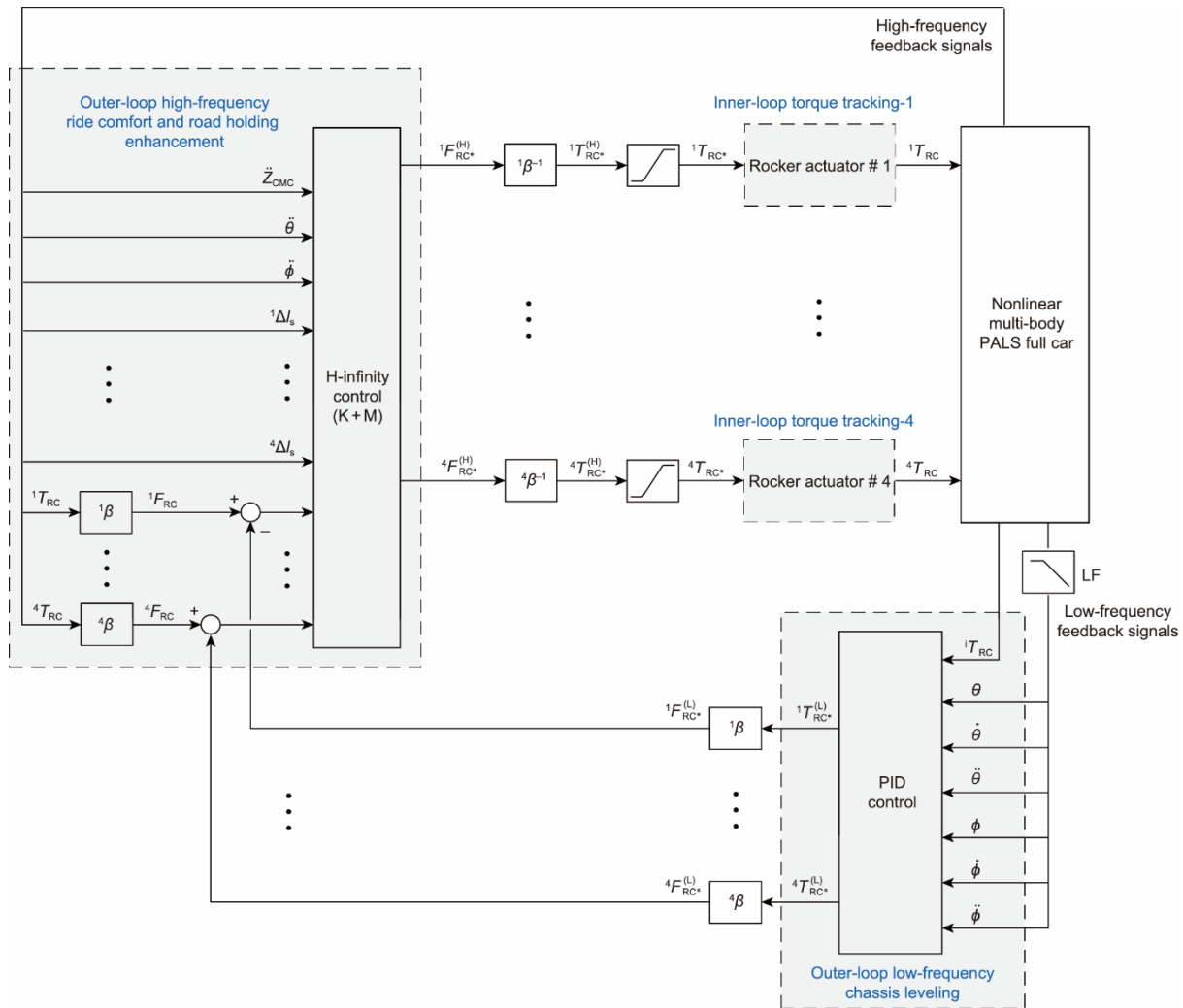


图9. 与频率相关的多目标控制方案的示意图, 该方案在其感兴趣的频率上同时实现底盘姿态稳定(使用在1 Hz以下有效的PID控制)和振动减弱(使用在1~8 Hz内有效的H- ∞ 控制)[52]。所示的应用例子是最近提出的基于连杆的PALS机电一体化悬架[49], 其中, T_{RC} 是旋转执行器对主动连杆组件的转矩, F_{RC} 是线性等效力(与弹簧阻尼器并联)。图中所有缩写的定义都可以在所引用的参考文献中找到。

同控制策略包括两层: 上层系统监控层, 用于通过计算乘驾条件的特征速度和决策逻辑来识别车辆状态; 以及一个较低的执行层, 旨在控制车辆控制子系统的执行器。由于悬架和转向执行器都影响车辆横向动力学, 它们的集成可以富有成效, 从而改善轨迹跟踪特性并增加可达范围。

3.4. 主动悬架控制的总结

一个ASS的控制策略的选择是一个复杂的问题, 因为它是由控制目标、悬架硬件、执行器频率响应、车辆类别、操作不确定性、传感器可用性、计算能力和许多其他因素决定的。总的来说, PID控制是一种简单而有效的算法, 允许ASS将底盘稳定在一个理想的姿态, 而H-无限大和MPC被广泛应用, 通过最小化从道路干扰到底盘振动的传播来提高乘驾舒适性和抓地力。由于合成H- ∞ 控制所需的线性化车辆模型容易识别, 且模型在实验和模拟环

境中的不确定性相对有限, 因此H- ∞ 控制在经过实验室实验和数值情况测试的研究文章中较为流行。MPC控制在存在显著不确定性的情况下更有利, 因为模型的动态可以迭代更新以计算最优控制增益。

上述经典方法进一步与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等智能控制算法相结合, 使自适应ASS操作能够更好地处理各种路况和驾驶场景[8,119–149]。随着传感技术、车辆电气化和车辆自动驾驶的发展, 未来ASS控制算法不仅会提高悬架性能, 还与其他模块协同操作, 实现更多功能, 包括: ①ASS中主动元件和电动阻尼器之间的“内部”协同, 同时实现乘驾舒适增强和能量收集; ②ASS和其他模块之间的协同(如ADAS的电子稳定程序), 以改善车辆的纵向和横向控制, 从而提高车辆的稳定性和安全性(例如, 防侧翻)[150]; 和③运输系统中CAV之间的协同, 以提高能源效率, 通过主动控制底盘的倾斜和俯仰

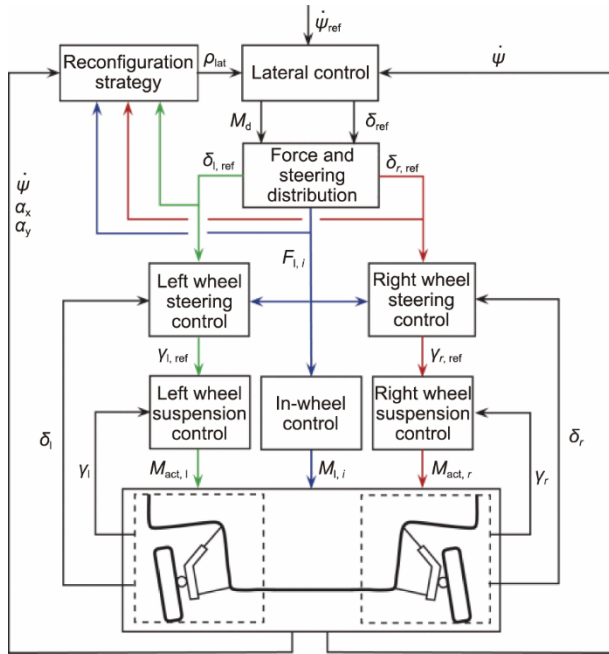


图10. 最近提出的可变几何悬架系统的车辆横向控制、转向控制和悬架控制的分层控制结构[114]。图中所有缩写的定义都可以在所引用的参考文献中找到。

角，可以降低空气阻力（受车辆距离的影响）。

4. 其他主题

ASS研究的其他主题包括数学模型、数值模拟和实验测试。

4.1. 数学模型

已经开发了一组具有ASS的数学模型，包括：①车辆运动学和动力学的非线性多体模型，用于进行数值模拟，以进行真实、可靠的车辆性能评估[43,151]；②线性等效模型，线性控制综合所需的模型，如LQG/LQR、 H_∞/H_2 和 μ -合成（第3节讨论）[46]；③稳态模型，用于分析ASS在底盘调平方面的能力（即可以处理的最大车辆纵向和横向加速度）[45]。

4.2. 数值模拟

在软件方面，仿真平台如AutoSim [152]、CarSim [153]和Matlab/Simulink（车辆动力学块集）[154]已被用于开发非线性车辆模型，并实现控制算法来进行数值模拟。他们的结果提供了在驾乘舒适度、抓地力、能耗等方面的准确和现实的评估[155–157]。道路事件是数值模拟的主要输入量。国际标准化组织（ISO）定义的一组驾驶操作，包括稳态循环驾驶[158]、步进转向[159]、连续正弦转向[159]、转弯制动[160]、鱼钩转向[161]，已经被用

于数值模拟测试车辆对恶劣驾驶行为的纵向和横向响应。还需要通过不同的路面粗糙度来测试提升运动，并确定悬架在驾乘舒适性和抓地力方面的性能。路面轮廓（即道路高度随驾驶距离的变化）可以根据ISO 8608: 2016 [162]进行数学计算，其中道路高度幅度与对数-对数图中的空间频率线性地减小；然后，可以通过进一步考虑其感兴趣的频率范围来评估悬架性能相关变量[163]。一些非ISO道路事件，如减速带、路坑和道路高度的正弦变化，也被用来测试四分之一车的垂直动态响应。

4.3. 实验测试

对ASS进行了实验测试，验证了新提出的硬件元件、机电系统、控制策略的实际可行性。使用单个悬架并模拟其在实际汽车中的操作的典型测试设备，通常被称为“四分之一车试验台”，其中通常测量的变量包括：①簧载质量的垂直加速度，反映驾乘舒适性；②垂直胎压，反映抓地力；③悬架偏转，反映所占或所需的空间；④执行器输出力或扭矩或功率，反映能量消耗。四分之一车试验台提供了一个简单的实验平台，能够从本质上评估悬架性能和控制鲁棒性。然而，在一些四分之一车的试验研究中存在两个主要的局限性：①使用缩小的弹簧质量和弹簧刚度参数来简化测试设置，使测试结果不真实；②忽略机械悬架结构的运动学（例如，悬架安装对悬架偏转的变化），弹簧阻尼器及簧载和非簧载质量采用线性配置。为了解决这些问题，可以考虑参考文献[164]中提出的一个双惯性系统，同时模拟（四分之一车的）簧载质量和负载转移（由于制动和转弯），从而促进高度紧凑的物理实现，同时避免缩减车辆参数的影响。该解决方案可用于新的ASS机制的快速原型设计和新的控制策略的实验验证。

一辆与ASS集成的真实汽车的道路测试提供了更真实的评估，这对悬架OEM的技术转让非常有价值。这是因为在四分之一车试验中难以包括的干扰，如负荷转移（由于制动和转弯）和ISO驾驶事件，可以在全车道路测试中得到充分评估；此外，还可以充分评估对汽车制造商至关重要的实际占用的空间、所需的电气配置、经济成本、质量增量和电力使用等实际因素。例如，将最近提出的SAVGS机电一体化悬架集成到马自达MX5实车底盘中，以评估在各种路况（包括ISO D级等效乡间道路和大学校园内的几个减速带）下，相对于被动悬架配置的悬架性能提升情况，结果显示底盘垂直加速度平均下降30%，驾乘舒适度得到很好的提高。对机械实施、质量增量、能耗和占用空间等实际因素进行了量化，指导其在量产车中的潜在应用[51]。

5. 对未来工作的结论和建议

本文全面综述了ASS的研究进展，重点介绍了最先进的机电一体化结构和控制策略。

现代ASS不仅包括主动施加簧载质量和非簧载质量之间的力或扭矩的元件，而且还包括每个硬件元件的技术进步：①从传统Macpherson/双横臂结构到多连杆连接臂，增加了车轮姿态调整的灵活性，从而提高抓地力和车辆操控能力；②从传统螺旋弹簧到空气弹簧，空气压力和悬架刚度也可以主动控制；③从传统的液压阻尼器到电动阻尼器，实现可调阻尼和能量收集。这些元件被集成在一起，为ASS制定不同的机电一体化系统解决方案，其中，重量增量小、实际占用空间、高频响应、低经济成本和低能耗等实际因素对量产车制造商来说是至关重要的。

配备空气悬架和旋转电动阻尼器的奥迪预测主动悬架（2017年在奥迪A8上亮相）及梅赛德斯Magic Body Control中的主动悬架（在2013年梅赛德斯-奔驰S类W222和2014年C217的最新版本中添加了路面扫描功能）代表了量产车中最先进的ASS解决方案。在学术界，基于连杆的机电一体化悬架概念SAVGS和PALS最近被提出并经过实验验证，显示出了低惯性、快速响应、可忽略的非簧载质量增量和故障安全特性的良好潜力。

在ASS控制方法中，PID控制主要用于稳定底盘在理想的姿态， H_∞ 控制和MPC被广泛用于减少底盘振动，从而提高乘驾舒适性和抓地力，其中，对车辆系统的不确定性具有良好的控制鲁棒性。这些经典的控制方法进一步与智能控制算法相结合，如模糊逻辑、神经网络、遗传算法等，使ASS能够自适应操作，更好地处理各种路况和驾驶场景。

建议今后开展以下关于ASSs开发的工作：通过重新排列硬件元件，可以优化和改进ASS的机电结构。例如，传统的螺旋弹簧能否被空气悬架取代，实现双控制操纵器，即空气压力和执行器扭矩？能否拆除减振器中的常规液压减振器，并通过主动控制的电动执行器实现其功能？在这种情况下，可以收集最初作为热量消耗的能量，而阻尼系数将是一个额外的变量，并被主动控制，以确保良好的乘驾舒适性和抓地力。另一个研究问题是，旋转电动阻尼器是否可以与空气悬架和底盘串联连接？

随着电动汽车的发展，辅助汽车的电气系统通常包括电池、转换器或逆变器、电气驱动器和传感器，将不会对其进行单独开发，而是需要将其优化和融合到汽车的整体电气化中。例如，电池、低直流到高直流转换器和永磁同步电机（PMSM）驱动器必须同时考虑车轮驱动和ASS主

动元件驱动。鉴于电动汽车中现有的传感系统（如惯性传感器），可以采用信息融合技术来重塑反馈测量和性能目标的ASS控制框架。例如，能否额外准确地估计每个拐角处垂直胎压的变化，以直接反映路面保持性能？

ASS未来的控制策略不仅将在独立模块内稳定底盘姿态，减弱底盘振动，而且还将构建一个分层、多目标、协同的控制框架，该框架与汽车的其他模块甚至其他汽车一起工作。更具体地说，“分层”意味着ASS控制将成为①高级驾驶决策的一部分，通过主动控制每辆车的底盘侧倾角，提高空气动力学特性，从而提高CAV整体运输系统的效率，这可能是一个对驾驶速度和其他连接车辆之间的距离的优化问题；②中层车辆纵向和横向控制，与ADAS中的转向、制动、ESC等其他电气模块协同运行，进一步提高车辆纵向和横向控制，从而提高驾驶稳定性和安全性；以及③低水平悬架本身，以实现提升动力学（即减弱底盘振动以提高乘驾舒适性和抓地力）、能量收集（在电动阻尼器的情况下）等目标。

当与神经网络、模糊逻辑、遗传算法方法和机器学习等新兴技术相结合时，ASS的控制策略将更加智能。其好处包括使ASS的控制焦点“可切换”，以更好地应对各种驾驶场景——也就是说，在CAV或赛车运输系统具有平整路面的情况下，悬架控制可以减少空气阻力，从而节约能源。而在路况较差的家庭驾驶旅程时，主要目标可以转向提高乘驾舒适度。

对于具有四分之一车试验研究的实际ASS演示，可以考虑使用双惯性系统来模拟簧载质量（四分之一车的）和负载传递（由于制动和转弯）。其主要好处是，整体测试设置可以产生一个更真实的评估平台，而不需要任何缩小规模的车辆参数，而物理实现可以非常紧凑。因此，该解决方案可用于快速原型设计，以实现新型的ASS机电一体化结构或控制策略。

Acknowledgements

This work was supported by the Imperial College Research Fellowship (ICRF 2022–2026).

Compliance with ethics guidelines

Min Yu, Simos Evangelou, and Daniele Dini declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.06.014>.

References

- [1] Gillespie TD. Fundamentals of vehicle dynamics, Vol. 400. Warrendale: Society of Automotive Engineers; 1992.
- [2] Dixon JC. Tires, suspension, and handling. 2nd ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers; 1996.
- [3] El-Beheiry EM. Bilinear control theory of smart damping systems. Cairo, Egypt. Amsterdam: Elsevier; 2000.
- [4] Kiencke U, Nielsen L. Automotive control systems: for engine, driveline, and vehicle. Berlin: Springer; 2005.
- [5] Blundell M, Harty D. Multibody systems approach to vehicle dynamics. Amsterdam: Elsevier; 2004.
- [6] Pacejka H. Tire and vehicle dynamics. Amsterdam: Elsevier; 2005.
- [7] Zhang HY, editor. Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes 2006. Burlington: Elsevier; 2007.
- [8] Savaresi SM, Poussot-Vassal C, Spelta C, Sename O, Dugard L. Semi-active suspension control design for vehicles. Oxford: Elsevier; 2010.
- [9] Rajamani R. Vehicle dynamics and control. Berlin: Springer; 2011.
- [10] Soliman AMA, Kaldas MMS. Semi-active suspension systems from research to mass-market—a review. J Low Freq Noise Vib Act Control 2019;40(2):1005–23.
- [11] Abdelkareem MAA, Xu L, Ali MKA, Elagouz A, Mi J, Guo S, et al. Vibration energy harvesting in automotive suspension system: a detailed review. Appl Energy 2018;229:672–99.
- [12] Raiciu T. How multi-link suspension works [Internet]. Bucharest: Autoevolution; 2009 Jun 17 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.autoevolution.com/news/how-multi-link-suspension-works-7804.html>.
- [13] Simionescu PA, Beale D. Synthesis and analysis of the five-link rear suspension system used in automobiles. Mechanism Mach Theory 2002;37 (9):815–32.
- [14] Suspension spring [Internet]. Schweinfurt: AAMPACT e.V. [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.my-cardictionary.com/chassis/suspensionspring.html>.
- [15] The world's fastest reacting suspension technology gets even faster with MagneRide 4.0 [Internet]. Detroit: Cadillac; 2020 Oct 15 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://media.cadillac.com/media/us/en/cadillac/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2020/oct/1015-technology.html>.
- [16] Crosse J. MagneRide suspension: design, development and applications [Internet]. Mumbai: Autocar Professional Online; 2014 Oct 29 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.autocarpro.in/feature/designdevelopment-applications-magneride-suspension-6686>.
- [17] Bedarff DIT, Pelz IP. Development of an active and integrated suspension system. 2012 Jan [cited 2022 Aug 1]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/305817033_Development_of_an_active_and_integrated_suspension_system.
- [18] Saintillan D. Extensional rheology of active suspensions. Phys Rev E 2010; 81(5):056307.
- [19] Xie L, Li J, Li X, Huang L, Cai S. Damping-tunable energy-harvesting vehicle damper with multiple controlled generators: design, modeling and experiments. Mech Syst Signal Process 2018;99:859–72.
- [20] Maravandi A, Moallem M. Regenerative shock absorber using a two-leg motion conversion mechanism. IEEE/ASME Trans Mechatron 2015; 20(6): 2853–61.
- [21] Audi developing electromechanical rotary dampers; potential for energy recuperation from suspension; 48V [Internet]. 2016 Aug [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.greencarcongress.com/2016/08/audi-developing-electromechanical-rotary-dampers-potential-for-energy-recuperation-from-suspension-4.html>.
- [22] Michelin to commercialize active wheel [Internet]. Available from: <https://www.greencarcongress.com/2008/12/michelin-to-com.html>.
- [23] Grillneder S. Multifaceted personality: predictive active suspension in the A8 flagship model. Ingolstadt: Audi MediaCenter; 2019 Jul 18 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/press-releases/multifaceted-personality-predictive-active-suspension-in-the-a8-flagship-model-11905>.
- [24] 2007 Citroen C5 [Internet]. 2020 Apr 19 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.topspeed.com/cars/citroen/2007-citroen-c5-ar32871.html>.
- [25] Trevitt A. Öhlins semi-active suspension | art & science. Irvine, CA: Cycle World; 2012 Jun 1 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.cycleworld.com/sport-rider/ohlins-semi-active-suspension-artsandscience/>.
- [26] Tenneco-Inc. Tenneco equips all-new Volvo XC90 first edition with Monroe intelligent suspension. Lake Forest: Tenneco; 2014 Nov 13 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.tenneco.com/news/news-detail/2014/11/13/tenneco-equips-all-new-volvo-xc90-first-edition-with-monroe-intelligentsuspension>.
- [27] Tenneco-Inc. Tenneco supplies Monroe intelligent suspension on new Renault Espace. Lake Forest: Tenneco; 2014 Dec 8 [cited 2022 Aug 1]. Available from: https://www.tenneco.com/tenneco_supplies_monroe%C2%AE_intelligent_suspension_on_new_renault_espace/.
- [28] Rabatel S. Michelin abandons the development of motorized wheels. 2017 Jun 30. Available from: <https://www.actu-automobile.com/2014/10/22/michelin-abandonne-le-developpement-des-roues-motorisees/>. French.
- [29] Schonfeld KH, Geiger H, Hesse KH. Electronically controlled air suspension (ECAS) for commercial vehicles. SAE Tech Pap 1991 Nov: 912671.
- [30] mbontario.com/mercedes-benz-airmatic-suspension-benefits[Internet]. Available from: <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/vehicledevelopment/the-airmatic-air-suspension-system/>.
- [31] Markel A. 2007_2011 Ford expedition and navigator air Suspension [Internet]. Akron, OH: Brake and Front End; 2019 Jan 28 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.brakeandfrontend.com/2007-2011-fordexpedition-and-navigator-air-suspension-2/>.
- [32] teslamotors.com [Internet]. Palo Alto: Tesla; c2023 [cited 2022 Aug 1]. Available from: www.teslamotors.com.
- [33] The Magic Body Control suspension system [Internet]. Stuttgart: Mercedes-Benz; 1999 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.mercedesbenzofcharleston.com/mercedes-benz-magic-body-control/>.
- [34] The new Mercedes-Benz GLE under the microscope: E-active body control suspension system [Internet]. Stuttgart: Mercedes-Benz; 2013 Jul 2 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.mercedes-benz.co.uk/passengercars/services/manuals.html/gls-suv-2022-12-x167-mbux/e-activebody-control/function-of-e-active-body-control>.
- [35] Buchmeier R, Kallweit J. The Predictive Chassis: ZF Vehicle Motion Control and Sensor Systems create a smooth ride into the future [Internet]. Friedrichshafen: ZF Friedrichshafen AG; 2019 Jul 2 [cited 2022 Aug 1]. Available from: https://press.zf.com/press/en/releases/release_9030.html.
- [36] Gavine A. ZF develops fully active chassis system. Vehicle Dynamics International; 2018 Jun 20 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.vehicle-dynamics-international.com/news/ride-comfort/zf-develops-fully-active-chassis-system.html>.
- [37] Howard B. Bose sells off its revolutionary electromagnetic suspension. ExtremeTech; 2017 Nov 15 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.extremetech.com/extreme/259042-bose-sells-off-revolutionary-electromagnetic-suspension>.
- [38] Cheromcha K. The crazy bose “magic carpet” car suspension system is finally headed for production. The Drive; 2018 May 22 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.thedrive.com/news/20996/the-crazy-bose-magic-carpetcar-suspension-system-is-finally-headed-for-production>.
- [39] Németh B, Gáspár P. Variable-geometry suspension design in driver assistance systems. In: 12nd European Control Conference; 2013 Jul 17–19; Zurich, Switzerland. Piscataway: IEEE Xplore; 2013. p. 1481–6.
- [40] Németh B, Gáspár P. Control design of variable-geometry suspension considering the construction system. IEEE Trans Vehicular Technol 2013; 62(8): 4104–9.
- [41] Németh B, Gáspár P. Set-based analysis of the variable-geometry suspension system. IFAC Proc 2014;47(3):11201–6.
- [42] Németh B, Gáspár P. Nonlinear analysis and control of a variable-geometry suspension system. Control Eng Pract 2017;61:279–91.
- [43] Arana C, Evangelou SA, Dini D. Series active variable geometry suspension for road vehicles. IEEE/ASME Trans Mechatron 2014;20(1):361–72.
- [44] Evangelou S, Kneip C, Dini D, De Meerschman O, Palas C, Tocatlian A. (2015). U.S. Patent No. 9,026,309. Washington, DC: US Patent and Trademark Office.
- [45] Arana C, Evangelou SA, Dini D. Series active variable geometry suspension application to chassis attitude control. IEEE/ASME Trans Mechatron 2015; 21(1):518–30.
- [46] Arana C, Evangelou SA, Dini D. Series active variable geometry suspension application to comfort enhancement. Control Eng Pract 2017;59:111–26.
- [47] Carlos AR. Active variable geometry suspension for cars [dissertation].

- London: Imperial College London; 2018.
- [48] Yu M, Arana C, Evangelou SA, Dini D. Quarter-car experimental study for series active variable geometry suspension. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2017;27(2):743–59.
 - [49] Yu M, Arana C, Evangelou SA, Dini D, Cleaver GD. Parallel active link suspension: a quarter-car experimental study. *IEEE-ASME Trans Mechatron* 2018;23(5):2066–77.
 - [50] Yu M, Evangelou SA, Dini D. Position control of parallel active link suspension with backlash. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;67(6):4741–51.
 - [51] Yu M, Cheng C, Evangelou SA, Dini D. Series active variable geometry suspension: full-car prototyping and road testing. *IEEE-ASME Trans Mechatron* 2021;27(3):1332–44.
 - [52] Yu M, Evangelou SA, Dini D. Parallel active link suspension: full car application with frequency-dependent multi-objective control strategies. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2021;30(5):2046–61.
 - [53] Yu M. Development of experimental techniques and control strategies for two novel road vehicle mechatronic suspensions [dissertation]. London: Imperial College London; 2018.
 - [54] Feng Z, Yu M, Cheng C, Evangelou SA, Jaimoukha IM, Dini D. Uncertainties investigation and l-synthesis control design for a full car with series active variable geometry suspension. *IFAC-PapersOnLine* 2020;53(2):13882–9.
 - [55] Braid D. Active wheel alignment system—Doftek Australia develops world first [Internet]. Melbourne: AFMA; 2020 30 Jul [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.doftek.com.au/>.
 - [56] Syaheer Z. Wheel alignment—what is camber, caster and toe. Lumpur: WapCar; 2020 May 29 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.wapcar.my/news/wheel-alignment-what-is-camber-caster-and-toe-2645>.
 - [57] Wilkinson L. Is Porsche's active suspension management system worth it? London: Auto Express. 2019 Oct 10 [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.autoexpress.co.uk/porsche/108127/is-porsche-s-activesuspension-management-system-worth-it>.
 - [58] Wang J, Wang W, Atallah K. A linear permanent-magnet motor for active vehicle suspension. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2010;60(1):55–63.
 - [59] Ebrahimi B, Bolandhemmat H, Khamesee MB, Golnaraghi F. A hybrid electromagnetic shock absorber for active vehicle suspension systems. *Veh Syst Dyn* 2011;49(1–2):311–32.
 - [60] Anubi OM, Crane CD. A new active variable stiffness suspension system using a nonlinear energy sink-based controller. *Veh Syst Dyn* 2013;51(10): 1588–602.
 - [61] Reze M, Osajda M. MEMS sensors for automotive vehicle stability control applications. In: Kraft M, White NM, editors. *Mems for automotive and aerospace applications*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2013. p. 29–53.
 - [62] Singal K, Rajamani R. Zero-energy active suspension system for automobiles with adaptive sky-hook damping. *J Vib Acoust* 2013;135(1):011011.
 - [63] Shi D, Chen L, Wang R, Jiang H, Shen Y. Design and experiment study of a semi-active energy-regenerative suspension system. *Smart Mater Struct* 2014; 24(1):015001.
 - [64] Wei X, Zhu M, Jia L. A semi-active control suspension system for railway vehicles with magnetorheological fluid dampers. *Veh Syst Dyn* 2016; 54(7): 982–1003.
 - [65] Abdulhammed Y, Elsherif H. Development of A New Automotive Active Suspension System. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 280, 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (ICMEAS 2017); 2017 Oct 13–15; Birmingham, UK. Bristol: IOP science; 2017.
 - [66] Koulcheris D, Papaioannou G, Chrysos E. A comparison of optimal semiactive suspension systems regarding vehicle ride comfort. *IOP Conf Series Mater Sci Eng* 2017;252:012022.
 - [67] Sharma SK, Kumar A. Ride performance of a high speed rail vehicle using controlled semi active suspension system. *Smart Mater Struct* 2017; 26(5): 055026.
 - [68] Zhao J, Liu H, Zhang L, Bei S. Design of a new integrated structure of the active suspension system and emergency lane change test. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 239, 2nd International Conference on Design and Manufacturing Engineering (ICDME2017); 2017 Aug 1–3; Guangzhou, China. Bristol: IOP science; 2017.
 - [69] Yan S, Sun W. Self-powered suspension criterion and energy regeneration implementation scheme of motor-driven active suspension. *Mech Syst Signal Process* 2017;94:297–311.
 - [70] Yurlin D. Intelligent systems of the vehicles' suspension. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 315, International Automobile Scientific Forum (IASF-2017) Intelligent Transport Systems; 2017 Oct 18–19; Moscow, Russian. Bristol: IOP science; 2017.
 - [71] Deng H, Han G, Zhang J, Wang M, Ma M, Zhong X, et al. Development of a nonpiston MR suspension rod for variable mass systems. *Smart Mater Struct* 2018;27(6):065014.
 - [72] Anderson ZM, Giovanardi M, Tucker C, Ekchian JA. (2019). Active safety suspension system. US Patent No. 10,377,371. Washington: US Patent and Trademark Office.
 - [73] Khodadadi H, Ghadiri H. Self-tuning PID controller design using fuzzy logic for half car active suspension system. *Int J Dynam Control* 2018;6(1):224–32.
 - [74] Yuan M, Manzie C, Good M, Shames I, Gan L, Keynejad F, et al. A review of industrial tracking control algorithms. *Control Eng Pract* 2020;102:104536.
 - [75] Kim H, Lee H. Fault-tolerant control algorithm for a four-corner closed-loop air suspension system. *IEEE Trans Ind Electron* 2011;58(10):4866–79.
 - [76] Kim H, Lee H. Height and leveling control of automotive air suspension system using sliding mode approach. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2011; 60(5): 2027–41.
 - [77] Sun W, Gao H, Kaynak O. Adaptive backstepping control for active suspension systems with hard constraints. *IEEE-ASME Trans Mechatron* 2012; 18(3): 1072–9.
 - [78] Huang SJ, Chen HY. Functional based adaptive and fuzzy sliding controller for non-autonomous active suspension system. *JSME Int J Ser C Mech Syst Mach Elem Manuf* 2006;49(4):1027–32.
 - [79] Pekgökgöz RK, Gürel MA, Bilgehan M, Kisa M. Active suspension of cars using fuzzy logic controller optimized by genetic algorithm. *Int J Adv Eng Sci Appl Math* 2010;2(4):27–37.
 - [80] Li H, Liu H, Gao H, Shi P. Reliable fuzzy control for active suspension systems with actuator delay and fault. *IEEE Trans Fuzzy Syst* 2011;20(2): 342–57.
 - [81] Li H, Yu J, Hilton C, Liu H. Adaptive sliding-mode control for nonlinear active suspension vehicle systems using T-S fuzzy approach. *IEEE Trans Ind Electron* 2012;60(8):3328–38.
 - [82] Lian RJ. Enhanced adaptive self-organizing fuzzy sliding-mode controller for active suspension systems. *IEEE Trans Ind Electron* 2012;60(3):958–68.
 - [83] Soliman MA, Kaldas MM, Barton DC, Brooks PC. Fuzzy-skyhook control for active suspension systems applied to a full vehicle model. *Int J Eng Technol Innov* 2012;2(2):85.
 - [84] Li H, Jing X, Lam HK, Shi P. Fuzzy sampled-data control for uncertain vehicle suspension systems. *IEEE Trans Cybern* 2014;44(7):1111–26.
 - [85] Huang C, Chen L, Jiang H, Yuan C, Xia T. Fuzzy chaos control for vehicle lateral dynamics based on active suspension system. *Chin J Mech Eng* 2014; 27(4):793–801.
 - [86] Qazi AJ, de Silva CW, Khan A, Khan MT. Performance analysis of a semiactive suspension system with particle swarm optimization and fuzzy logic control. *Sci World J* 2014;174102.
 - [87] Wen S, Chen MZ, Zeng Z, Yu X, Huang T. Fuzzy control for uncertain vehicle active suspension systems via dynamic sliding-mode approach. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst* 2016;47(1):24–32.
 - [88] Shao X, Naghdy F, Du H. Reliable fuzzy H1 control for active suspension of in-wheel motor driven electric vehicles with dynamic damping. *Mech Syst Signal Process* 2017;87:365–83.
 - [89] Li H, Zhang Z, Yan H, Xie X. Adaptive event-triggered fuzzy control for uncertain active suspension systems. *IEEE Trans Cybern* 2019;49 (12):4388–97.
 - [90] Li W, Xie Z, Zhao J, Wong PK, Li P. Fuzzy finite-frequency output feedback control for nonlinear active suspension systems with time delay and output constraints. *Mech Syst Signal Process* 2019;132:315–34.
 - [91] Liu Y, Zeng Q, Tong S, Chen CPL, Liu L. Adaptive neural network control for active suspension systems with time-varying vertical displacement and speed constraints. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;66(12):9458–66.
 - [92] Yuan Y, Tang X, Zhou W, Pan W, Li X, Zhang H, et al. Data driven discovery of cyber physical systems. *Nat Commun* 2019;10:4894.
 - [93] Poussot-Vassal C, Senane O, Dugard L, Ramirez-Mendoza R, Flores L. Optimal Skyhook Control for Semi-Active Suspensions. *IFAC Proc* 2006; 39(16):608–13.
 - [94] Tiwari A, Lathkar M, Shendge PD, Phadke SB. Skyhook control for active suspension system of heavy duty vehicles using inertial delay control. In: *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*; 2016 Jul 4–6; Delhi, India. Piscataway: IEEE Xplore; 2016.
 - [95] Priyandoko G, Mailah M, Jamaluddin H. Vehicle active suspension system using skyhook adaptive neuro active force control. *Mech Syst Signal Process* 2009;23(3):855–68.
 - [96] Yi K, Song BS. A new adaptive sky-hook control of vehicle semi-active suspensions. *Proc Inst Mech Eng, Part D* 2019;213(3):293–303.
 - [97] Hong K, Sohn H, Hedrick K. Modified skyhook control of semi-active

- suspensions: a new model, gain scheduling, and hardware-in-the-loop tuning. *J Dyn Syst Meas Control* 2000;124(1):158–67.
- [98] Sam YM, Ghani MRHA, Ahmad N. LQR controller for active car suspension. In: 2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium (Cat. No. 00CH37119); 2000 Sep 24–27; Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Xplore; 2002. p. 441–4.
- [99] Taghirad HD, Esmailzadeh E. Automobile passenger comfort assured through LQG/LQR active suspension. *J Vib Control* 1998;4(5):603–18.
- [100] Zhou K, Doyle JC. *Essentials of Robust Control*. Upper Saddle River: Prentice hall; 1998.
- [101] Sun W, Gao H, Kaynak O. Finite frequency H1 control for vehicle active suspension systems. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2010;19(2):416–22.
- [102] Li H, Jing X, Karimi HR. Output-feedback-based H1 control for vehicle suspension systems with control delay. *IEEE Trans Ind Electron* 2013;61(1):436–46.
- [103] Canale M, Milanese M, Novara C. Semi-active suspension control using “fast” model-predictive techniques. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2006;14(6):1034–46.
- [104] Yuan Y, Zhang HT, Wu Y, Zhu T, Ding H. Bayesian learning-based modelpredictive vibration control for thin-walled workpiece machining processes. *IEEE-ASME Trans Mechatron* 2016;22(1):509–20.
- [105] Theunissen J, Sornioti A, Gruber P, Fallah S, Ricco M, Kvasnica M, et al. Regionless explicit model predictive control of active suspension systems with preview. *IEEE Trans Ind Electron* 2019;67(6):4877–88.
- [106] Utkin V. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Trans Automat Contr* 1977;22(2):212–22.
- [107] Zhang H, Wang E, Zhang N, Min F, Subash R, Su C. Semi-active sliding mode control of vehicle suspension with magneto-rheological damper. *Chin J Mech Eng* 2015;28(1):63–75.
- [108] Liu S, Zhou H, Luo X, Xiao J. Adaptive sliding fault tolerant control for nonlinear uncertain active suspension systems. *J Franklin Inst* 2016;353(1):180–99.
- [109] Rath JJ, Defoort M, Karimi HR, Veluvolu KC. Output feedback active suspension control with higher order terminal sliding mode. *IEEE Trans Ind Electron* 2016;64(2):1392–403.
- [110] Yagiz N, Hacıoglu Y. Backstepping control of a vehicle with active suspensions. *Control Eng Pract* 2008;16(12):1457–67.
- [111] Lin JS, Huang CJ. Nonlinear backstepping active suspension design applied to a half-car model. *Veh Syst Dyn* 2004;42(6):373–93.
- [112] Zapateiro M, Luo N, Karimi HR, Vehi J. Vibration control of a class of semiactive suspension system using neural network and backstepping techniques. *Mech Syst Signal Process* 2009;23(6):1946–53.
- [113] Zhao J, Wong PK, Ma X, Xie Z. Chassis integrated control for active suspension, active front steering and direct yaw moment systems using hierarchical strategy. *Veh Syst Dyn* 2017;55(1):72–103.
- [114] Németh B, Fényes D, Gáspár P, Bokor J. Coordination of independent steering and torque vectoring in a variable-geometry suspension system. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2018;27(5):2209–20.
- [115] Lu SB, Li YN, Choi SB, Zheng L, Seong MS. Integrated control on MR vehicle suspension system associated with braking and steering control. *Veh Syst Dyn* 2011;49(1–2):361–80.
- [116] Termous H, Shraim H, Talj R, Francis C, Charara A. Coordinated control strategies for active steering, differential braking and active suspension for vehicle stability, handling and safety improvement. *Veh Syst Dyn* 2019;57(10):1494–529.
- [117] Xiao H, Chen W, Zhou H, Zu JW. Integrated control of active suspension system and electronic stability programme using hierarchical control strategy: theory and experiment. *Veh Syst Dyn* 2011;49(1–2):381–97.
- [118] Zhang G, Cao J, Yu F. Design of active and energy-regenerative controllers for DC-motor-based suspension. *Mechatronics* 2012;22(8):1124–34.
- [119] Smith MC, Wang FC. Controller parameterization for disturbance response decoupling: application to vehicle active suspension control. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2002;10(3):393–407.
- [120] Chen PC, Huang AC. Adaptive sliding control of non-autonomous active suspension systems with time-varying loadings. *J Sound Vibrat* 2005;282(3–5):1119–35.
- [121] Nguyen LH, Hong KS, Park S. Road-frequency adaptive control for semi-active suspension systems. *Int J Control Autom Syst* 2010;8(5):1029–38.
- [122] Lin J, Lian RJ. Intelligent control of active suspension systems. *IEEE Trans Ind Electron* 2010;58(2):618–28.
- [123] Chen BC, Shiu YH, Hsieh FC. Sliding-mode control for semi-active suspension with actuator dynamics. *Veh Syst Dyn* 2011;49(1–2):277–90.
- [124] Goodarzi A, Oloomi E, Esmailzadeh E. Design and analysis of an intelligent controller for active geometry suspension systems. *Veh Syst Dyn* 2011;49(1–2):333–59.
- [125] Qiu J, Ren M, Zhao Y, Guo Y. Active fault-tolerant control for vehicle active suspension systems in finite-frequency domain. *IET Control Theory Appl* 2011;5(13):1544–50.
- [126] Talib MHA, Darns IZM. Self-tuning PID controller for active suspension system with hydraulic actuator. In: 2013 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI); 2013 Apr 7–9; Piscataway: IEEE Xplore; 2013. p. 86–91.
- [127] Van der Sande TPJ, Gysen BLJ, Besselink IJM, Paulides JJH, Lomonova EA, Nijmeijer H. Robust control of an electromagnetic active suspension system: simulations and measurements. *Mechatronics* 2013;23(2):204–12.
- [128] Göhrle C, Schindler A, Wagner A, Sawodny O. Road profile estimation and preview control for low-bandwidth active suspension systems. *IEEE-ASME Trans Mechatron* 2014;20(5):2299–310.
- [129] Ahmed AENS, Ali AS, Ghazaly NM, Abd el-Jaber GT. PID controller of active suspension system for a quarter car model. *Int J Adv Eng Technol* 2015;8(6):899–909.
- [130] El Majdoub K, Ghani D, Giri F, Chaoui FZ. Adaptive semi-active suspension of quarter-vehicle with magnetorheological damper. *J Dyn Syst Meas Control* 2015;137(2):021010.
- [131] Huang Y, Na J, Wu X, Liu X, Guo Y. Adaptive control of nonlinear uncertain active suspension systems with prescribed performance. *ISA Trans* 2015;54:145–55.
- [132] Sun W, Pan H, Gao H. Filter-based adaptive vibration control for active vehicle suspensions with electrohydraulic actuators. *IEEE Trans Vehicular Technol* 2015;65(6):4619–26.
- [133] Wang R, Jing H, Karimi HR, Chen N. Robust fault-tolerant H1 control of active suspension systems with finite-frequency constraint. *Mech Syst Signal Process* 2015;62–63:341–55.
- [134] Yin X, Zhang L, Zhu Y, Wang C, Li Z. Robust control of networked systems with variable communication capabilities and application to a semi-active suspension system. *IEEE-ASME Trans Mechatron* 2016;21(4):2097–107.
- [135] Zhao F, Ge SS, Tu F, Qin Y, Dong M. Adaptive neural network control for active suspension system with actuator saturation. *IET Control Theory Appl* 2016;10(14):1696–705.
- [136] Hasbullah F, Faris WF. Simulation of disturbance rejection control of half-car active suspension system using active disturbance rejection control with decoupling transformation. *J Phys Conf Ser* 2017;949:012025.
- [137] Pan H, Sun W, Jing X, Gao H, Yao J. Adaptive tracking control for active suspension systems with non-ideal actuators. *J Sound Vibrat* 2017;399:2–20.
- [138] Qin Y, Zhao F, Wang Z, Gu L, Dong M. Comprehensive analysis for influence of controllable damper time delay on semi-active suspension control strategies. *J Vib Acoust* 2017;139(3):031006.
- [139] Wang G, Chen C, Yu S. Robust non-fragile finite-frequency H1 static outputfeedback control for active suspension systems. *Mech Syst Signal Process* 2017;91:41–56.
- [140] Čorić M, Deur J, Xu L, Tseng HE, Hrovat D. Optimisation of active suspension control inputs for improved performance of active safety systems. *Veh Syst Dyn* 2018;56(1):1–26.
- [141] Pan H, Sun W. Nonlinear output feedback finite-time control for vehicle active suspension systems. *IEEE Trans Industr Inform* 2018;15(4):2073–82.
- [142] Fei Z, Wang X, Liu M, Yu J. Reliable control for vehicle active suspension systems under event-triggered scheme with frequency range limitation. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst* 2019;51(3):1630–41.
- [143] Formentin S, Karimi A. A data-driven approach to mixed-sensitivity control with application to an active suspension system. *IEEE Trans Industr Inform* 2012;9(4):2293–300.
- [144] Guo LX, Zhang LP. Robust H1 control of active vehicle suspension under nonstationary running. *J Sound Vibrat* 2012;331(26):5824–37.
- [145] Sun W, Zhao Z, Gao H. Saturated adaptive robust control for active suspension systems. *IEEE Trans Ind Electron* 2012;60(9):3889–96.
- [146] Göhrle C, Schindler A, Wagner A, Sawodny O. Design and vehicle implementation of preview active suspension controllers. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2013;22(3):1135–42.
- [147] Yim S. Design of a robust controller for rollover prevention with active suspension and differential braking. *J Mech Sci Technol* 2012;26(1):213–22.
- [148] Yuan Y, Ma G, Cheng C, Zhou B, Zhao H, Zhang HT, et al. A general end-to-end diagnosis framework for manufacturing systems. *Natl Sci Rev* 2020;7(2):418–29.
- [149] Wang J, Jin F, Zhou L, Li P. Implementation of model-free motion control for active suspension systems. *Mech Syst Signal Process* 2019;119:589–602.
- [150] Yim S, Park Y, Yi K. Design of active suspension and electronic stability

- program for rollover prevention. *Int J Automot Technol* 2010;11(2):147–53.
- [151] Docquier N, Poncelet A, Delannoy M, Fiset P. Multiphysics modelling of multibody systems: application to car semi-active suspensions. *Veh Syst Dyn* 2010;48(12):1439–60.
- [152] AutoSim 2.5+ reference manual, Mechanical Simulation Corporation, Ann Arbor MI, USA; 1997.
- [153] Carsim.com [Internet]. Ann Arbor: carsim; 2020 Jun [cited 2022 Aug 1]. Available from: <https://www.carsim.com/products/carsim/>.
- [154] MathWorks. Vehicle Dynamics Blockset. Natick: MathWorks. Available from: <https://uk.mathworks.com/products/vehicle-dynamics.html>.
- [155] Agharkakli A, Sabet GS, Barouz A. Simulation and analysis of passive and active suspension system using quarter car model for different road profile. *Int J Eng Trends Technol* 2012;3(5):636–44.
- [156] Joshi A. Powertrain and chassis hardware-in-the-loop (HIL) simulation of autonomous vehicle platform. In: Joshi A, editor. *Automotive applications of hardware-in-the-Loop (HIL) simulation*. Warrendale: SEA Tech Pap; 2017. p. 37–60.
- [157] Xia Y, Fu M, Li C, Pu F, Xu Y. Active disturbance rejection control for active suspension system of tracked vehicles with gun. *IEEE Trans Ind Electron* 2017; 65(5):4051–60.
- [158] ISO 4138: 2004: Passenger cars—steady-state circular driving behaviour—Open-loop test methods. ISO standard. Geneva: ISO; 2004.
- [159] ISO 7401: 2011: Road vehicles—Lateral transient response test methods—Open-loop test methods. ISO standard. Geneva: ISO; 2011.
- [160] ISO 7975: 2006: Passenger cars—Braking in a turn—Open-loop test method. ISO standard. Geneva: ISO; 2006.
- [161] US Department of Transportation. Laboratory test procedure for dynamic rollover: the fishhook maneuver test procedure. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration; 2013.
- [162] ISO 8608: 2016: Mechanical vibration—road surface profiles—Reporting of measured data. ISO standard. Geneva: ISO; 2016.
- [163] ISO 2631-1: 1997: Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration—part 1, general requirements. ISO standard. London: ISO; 1997.
- [164] Smith MC. Synthesis of mechanical networks: the inerter. *IEEE Trans Automat Contr* 2002;47(10):1648–62.