

综 述

半主动悬架研究

冯 薇, 李子旭, 王云超, 胡志超

(集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 介绍国内外车辆悬架半主动控制研究的最新进展。阐述半主动悬架技术的产生背景, 分析设计与优化过程中所用到的车辆模型和评价指标; 结合国内外研究成果, 对半主动悬架的控制方法和可调节减振器, 作了较为详细的回顾和总结; 列举出几种应用最广泛的半主动悬架控制方法并分析各自的优劣势, 指出不同的控制方法相互结合可以达到更好的优化控制效果; 阐述不同种类可调节减振器的工作原理; 最后探讨半主动悬架发展的趋势, 为车辆悬架半主动控制的进一步研究提供参考。

[关键词] 半主动悬架; 可调节减振器; 控制方法

[中图分类号] TH 113

Review of Researches on Semi-Active Suspension

FENG Wei, LI Zixu, WANG Yunchao, HU Zhichao

(School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The latest development in the research on semi-active control of automobile suspensions in domestic and abroad is reviewed. In this article, the background of semi-active suspension technology is introduced, the vehicle models and evaluation indexes which are used in the design and optimization processes are analyzed, and the control method and adjustable dampers of semi-active suspension are reviewed and summarized in detail according to the researches at home and abroad. Some widely used semi-active suspension control methods are mentioned, and their advantages or disadvantages are analyzed. Meanwhile, it is concluded that each control method must be combined with the other methods to achieve better control effect. The working principles of different kinds of adjustable dampers are also recommended. At last, the development tendency is discussed. It provides reference for further research on semi-active control of vehicle suspension.

Keywords: semi-active suspension; adjustable dampers; control methods

0 引言

悬架系统作为车辆的重要组成部分之一, 对车辆平顺性、操纵稳定性和安全性有着重要的影响。理想的悬架系统常以降低车身垂向加速度、悬架的动变形和车轮的动载荷作为优化目标^[1-2]。传统的被动悬架结构简单、无需外部能量, 缺乏实时改变悬架参数以改善各项性能的能力。采用改进作动器和控制算法的主动悬架可以显著地改善车辆的性能, 但是成本高昂、结构复杂且需要消耗大量的能量。半主动悬架通过改变阻尼器的阻尼大小来适应不同道路, 无需外部能量输入, 成本低、结构简

[收稿日期] 2020-04-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目(5157523)

[作者简介] 冯薇(1980—), 女, 讲师, 主要从事机构设计和油气悬挂系统特性分析。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

单, 同时能够近似达到主动控制的效果, 因此成为悬架研究的热点。

本文从半主动悬架研究涉及的车辆动力学模型、半主动控制算法和悬架类型等三个方面进行归纳总结和展望。

1 半主动悬架控制的车辆动力学模型

车辆动力学模型是半主动悬架控制的基础, 动力学模型的精度对悬架的控制精度产生重要影响, 车辆动力学模型的精度越高对控制器的运算能力要求越高, 如果车辆动力学模型过于复杂, 那么控制器运算时间就会过长, 从而导致控制迟滞, 影响控制效果。因此, 车辆动力学模型的精度与悬架控制器的运算能力的匹配水平直接影响半主动悬架系统的效果。目前, 半主动悬架控制常用的车辆动力学模型包括: 单自由度和二自由度^[3] 1/4 车辆模型、四自由度 1/2 车辆模型^[4]、七自由度整车模型^[5] 等。单自由度 1/4 车辆模型是最初应用的模型。而随着研究的深入, 考虑到簧上质量与簧下质量的不同影响以及作动器的作用特点, 二自由度 1/4 车辆模型被建立并得到广泛应用^[3]。四自由度 1/2 车辆模型^[4] 是考虑车身的俯仰、侧倾与两个非簧载质量垂直方向的位移而建立的模型。七自由度整车模型^[5] 的建立考虑了车身质心在三个方向上的位移和四个非簧载质量垂直方向上的位移。九自由度整车模型在七自由度模型的基础上考虑了车身质心的俯仰与侧倾运动^[5-6]。

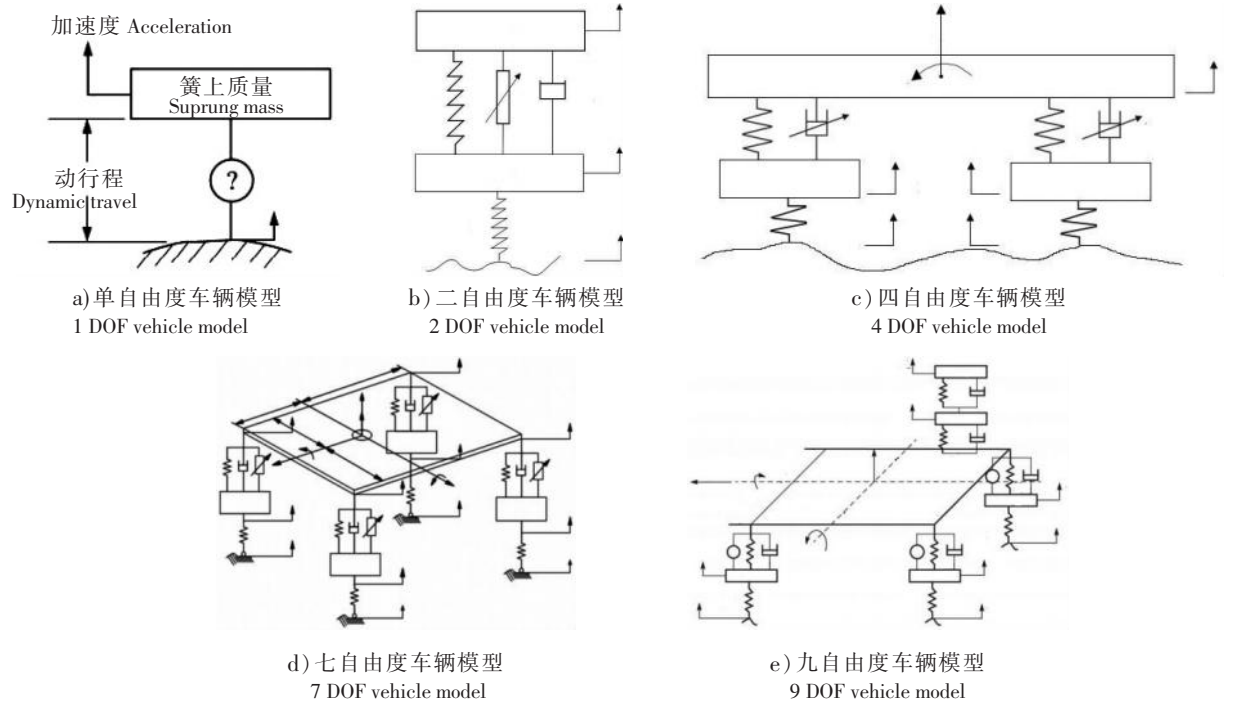


图 1 多种车辆模型

Fig.1 Several types of vehicle models

2 半主动控制算法

半主动控制算法是半主动悬架控制的核心, 控制算法的合理性和适用性决定着悬架控制的性能。随着悬架技术的不断进步, 对于性能的要求也不断提高, 因此针对不同因素对悬架控制的影响, 产生了多种半主动悬架控制算法, 每种算法所侧重解决的悬架问题也各不相同。如: 最优控制算法解决各项性能的综合优化; 鲁棒控制算法提高悬架的抗外界扰动能力等。针对不同工况不同类型的悬架, 应基于相应的特点, 合理的选择控制算法, 或有机结合多种控制算法进行综合优化控制, 同时考虑融合算法的时效性, 才能最大程度地提升悬架的控制效果。目前评价控制算法效果的三个主要指标是: 车

身垂直加速度表征平顺性；悬架动挠度表征悬架振动和缓冲冲击的能力；轮胎动变形表征轮胎的变形程度和接地性，也是表征操纵稳定性的评价指标。三种指标均以数值最小为最优，但存在此消彼长的现象，因此也会应用加权系数将多种评价指标结合进行综合评价^[7]。

2.1 天棚、地棚阻尼控制算法

天棚控制算法是由 Karnopp 等^[8]于 1974 年提出的一种旨在控制悬挂质量振动的一种控制算法。为了改善被动悬架因结构参数固定造成的性能不佳问题，基于天棚控制算法，半主动悬架根据阻尼系数与车体 - 车轮相对运动速度、车身垂向加速度的关系，控制与簧载质量相连的阻尼器的阻尼，从而抑制车体与车轮之间相对运动速度变化，改善车辆的行驶平顺性，但是造成操纵稳定性的一定恶化。在状态反馈情况下，基于天棚控制算法的半主动悬架控制可以达到近似主动控制的效果。

地棚控制算法是一种旨在控制非悬挂质量振动的控制算法。在半主动悬架控制中，地棚控制算法根据阻尼系数与非簧载质量绝对运动速度、车轮 - 地面相对位移（与车轮动载荷相关）的关系，控制与非簧载质量连接的阻尼器阻尼，改善车辆的操纵稳定性^[9-12]。

天、地棚控制模型如图 2 所示。采用加权方法或工作域分析法，将二者的优点结合得到天棚地棚混合阻尼控制^[13]。

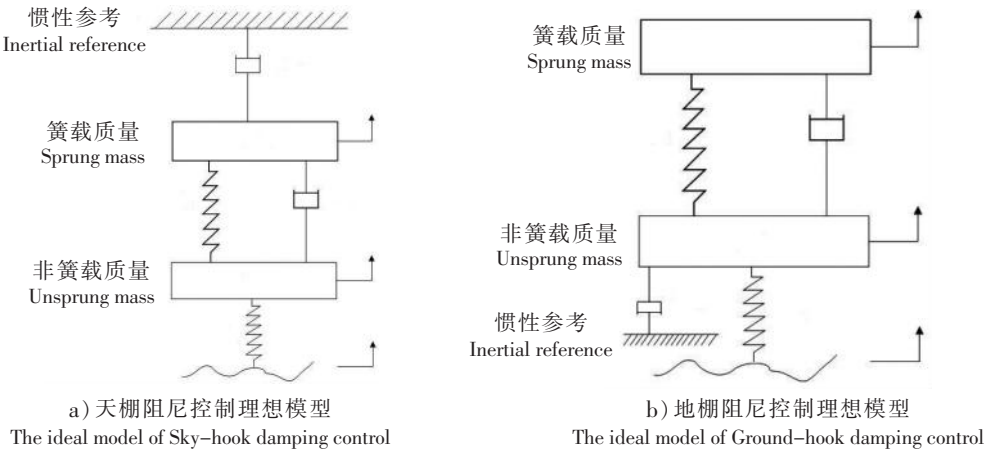


图 2 天、地棚车辆模型

Fig.2 Vehicle models of sky-hook and Ground-hook Damping control

由于天、地棚控制算法的性能指标较为单一，所以在某些工况下会造成其他性能恶化的情况，同时得到的控制律并不连续，控制效果有限，且对于作动器冲击较大。但是这两种控制算法突破了被动悬架特性固定而无法适应多变路面环境的缺点，具有原理简单、效果显著且响应迅速等优点，在此基础上衍生出了很多改进算法，并与其他算法结合可进一步提升悬架性能^[14-17]。

2.2 最优控制算法

相比于天棚、地棚控制算法，最优控制算法更为重视车辆的整体性能，追求在不恶化各项性能的前提下，提升悬架的综合特性。最优控制算法的原理是构建一个由两个悬架性能指标组成的目标函数，然后借助数学方法求得极值，得出此时控制输入的参数值，由作动器实现控制动作。由于半主动悬架控制无外部能量输入，所以半主动悬架无法提供主动控制力，半主动控制力为零，而在其他情况下，半主动控制力为最优控制算法的计算值。

最常用的最优控制算法是线性最优控制。线性最优控制算法是利用现代控制理论整合所需要的性能指标，确定系统的状态变量和控制变量，建立状态方程，通过加权方式综合考虑各项性能指标的影响^[18-19]。最优控制通常采用 LQR（linear quadratic regulator）或 LQG（linear quadratic gaussian）控制器，借助加权系数，综合考虑车身垂直加速度、悬挂动挠度和车轮动变形等各项性能指标，最终求得最佳的作动器控制力^[20-23]。但加权系数的选取往往依靠经验，没有一个客观具体的选取标准，不能

得到最佳的优化效果,因此悬架综合性能加权系数的选取也是线性最优控制的热点研究方向之一。

综合性能评价目标函数如式(1)所示:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T [q_1 \ddot{x}_2^2 + q_2 (x_2 - x_1)^2 + q_3 (x_1 - x_0)^2] dt / T. \quad (1)$$

其中: q_1 为悬挂质量垂向加速度加权系数; q_2 为悬架动挠度加权系数; q_3 为轮胎动变形加权系数。

王一凡^[24]针对加权系数依靠经验选取的不足,将混合蛙跳算法引入车辆半主动悬架 LQG 控制,将车辆垂向减速度、悬架动挠度、轮胎动变形均方根值与被动悬架的比值之和最小作为适应度函数进行寻优,提升了加权系数选取的优化程度,最终令三种性能指标都有不同程度的减小。

最优控制局限性在于依赖理想悬架模型,而悬架的实际工作环境中具有很多不确定性的非线性因素和外部扰动,尤其在极限状态下,此时的悬架模型是动态变化的,单纯依靠最优控制无法实现性能的优化,有时甚至还会恶化悬架的性能,因此可以结合鲁棒控制算法等消除外部扰动的影响。

2.3 鲁棒控制算法

鲁棒性(robust)是指系统在外部扰动下也能够正常工作的特性, H_∞ 控制是应用较多的鲁棒控制方法^[25],主要解决线性二次最优控制问题;之后, Doyle 等^[26]提出了针对连续时间系统规范化的 H_∞ 控制方法,进一步拓展了控制方法的适用范畴。 H_∞ 控制方法通过建立系统状态方程,确定了系统控制矩阵,根据 Lyapunov 方程和 Raccati 方程确定系统稳定控制矩阵内参数的取值范围,在此范围内,确定能使 H_∞ 范数极小的控制矩阵参数值,并通过作动器实现稳定控制,从而改善系统的性能。这种控制方法能使系统具有良好的鲁棒性,因此适用于控制外部扰动频繁复杂的悬架系统^[27-29]。

将鲁棒控制应用于悬架设计与控制可以有效地降低行驶路况的不规则扰动和振动对车辆的影响,从而保证了车辆行驶在不平路面或者应对不可预知的路面冲击时系统依然保持其稳定性^[30-32]。

傅志方^[33]为提高悬架抗干扰能力,采用 H_∞ 控制方法,针对天棚原理控制律不连续的问题,通过频域整形手段设计出半主动悬架控制器,提升了 3~8Hz 悬架连续抗振动性能。Fujitai 等^[34]结合 Yamashita 等^[35]和 Santos 等^[36]基于状态反馈的半主动悬架控制方法,针对高频振动和人体共振频段振动影响悬架舒适性的问题,设计出一种运用 H_∞ 方法和非线性方法的半主动悬架综合性能优化方法,并将优化结果作为约束条件,对操纵稳定性进行分析和计算,获得保证平顺性的权重系数,达到综合优化。文献[37-38]提出了一种针对工业液压阻尼器的 H_∞ /LPV 控制器的设计,将负反馈策略、状态观测器和非线性控制器与 H_∞ 相结合,提升稳定性的同时减少了因抵抗外部扰动所需的阻尼力。Strohm 等^[39]为了改善 H_∞ 控制滞后的问题,将预测前馈策略引入控制器的设计,提高了控制的有效性。

鲁棒控制算法以提升悬架的稳定性为主,但并不能随行驶路况和系统结构变化改变悬架的性能参数,因此常与其他控制方法结合使用,从而进一步提升悬架系统的综合性能^[40-42],如与自适应控制算法或滑模控制算法等结合提高系统对工况变化的适应能力。

2.4 自适应控制算法

自适应控制可以根据系统参数与外部工况的变化自行调整,使控制系统在新的参数下达到最优性能^[1,21],有效弥补定常系统在复杂工况下性能较差的缺陷。自适应控制的关键在于对变化工况的观测和预测,将其应用于悬架控制可以显著提升变化路况下车辆的综合性能。

自适应控制分为模型参考自适应控制和自校正控制两种类型,二者的区别在于调节器:模型参考自适应控制是直接更新的,效果好但是成本较高;自校正控制的调节器是通过参数估计和控制器的设计来发挥作用的^[43-46],与模型参考型相比,其更新速度和调节效果略差。

方敏等^[47]和陈无畏等^[48]为减小路面不确定激励对悬架的影响,采用辨识器对未来时刻的未知路面参数进行了估计和预测,并基于预测结果,结合自适应与半主动悬架 LQG 控制改变悬架弹性恢复力,有效地减小了车身振动,提高了车辆平顺性。XMA 等^[49]为确定磁流变阻尼器在高频随机振动下的连续输入电压,应用标度因子值对车身的振动加速度进行预测,采用自适应策略对反馈调节磁流变

阻尼器的输入电流进行调节，提升了阻尼器的连续性减振效果。王新等^[50]为减小悬架系统参数不确定性的影响，采用自适应 Backstepping 方法预测参数变化，改善了半主动悬架滑模控制鲁棒性差的问题。自适应控制是现代控制技术的重要组成部分，也是未来智能控制的基础。但是其限制性与最优控制类似，需要精确的动态悬架模型才能够预测扰动产生的影响，而悬架系统内外因素复杂，并不易于获取精确的动态悬架模型；模型修正需要大量传感器，成本高。因此在无法进行有效控制时，可以结合鲁棒控制等方法或采用其他不依赖精确模型的控制方法。

2.5 滑模控制算法

滑模控制最早由 Utkin^[51] 提出，后经不断完善，成为控制理论中的一个分支。滑模控制系统的结构可以随着系统的状态而改变，并根据状态的变化对控制进行切换；系统的滑动模态方程与系统参数和外部的扰动无关，因而具备良好的鲁棒性，适用于因系统复杂和外部扰动复杂而无法获取精确动态模型时的悬架控制。

滑模控制适用于各类控制系统的应用^[52-53]。滑模的关键在滑模面的选取，滑模运动点分为三种：平常点、起始点与终止点，如图 3 所示。应用最多的是终止点，即系统的运动点在到达切换面 $s=0$ 附近时，从切换面的两边趋近该点。

将滑模控制应用于悬架，有助于车辆在应对不同路况与工况时，能够尽快消除外部扰动影响，并以优化后的控制律进行工作。

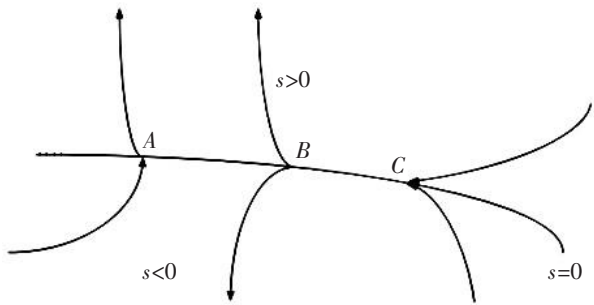
早在 1990 年 Platin 等^[54]将滑动模态控制方法应用于海上平台的遥控运载车，以解决在平台上定位和轨迹的不确定性问题。郑玲等^[55]将滑模变结构控制与天棚阻尼控制结合，用于提高在外部扰动和悬架模型参数变化情况下悬架的适应性，结果表明，设计出的控制器具有良好的鲁棒性、稳定性和跟踪性，但在高频振动下的效果并不明显。赵成等^[56]设计了一种用于电流变液阻尼器的滑模控制器，并结合可控阻尼力对隔振质量做负功的原理，提出了相应的半主动控制策略。通过仿真与最优被动控制作比较，结果表明，新的控制方法在位移响应和加速度响应方面的表现都优于被动控制。王乃洲^[57]和陈炎冬等^[58]将分数阶理论与指数趋近律相结合，在半主动悬架控制器观测器设计上拓宽了范围，使得系统具有更好的稳态误差，能够更快的趋近滑模面，提升系统的整体动态性能。

滑模控制的缺陷是系统运动点穿过滑模面时，开关切换会造成系统的抖振，使系统不能完全按照设计轨迹趋近，因此也常与 PID 等控制方法结合来减弱抖振；因滑模运动分为趋近和沿滑模面运动两个阶段，所以控制的时效性并不好，此时可以结合响应迅速的天棚控制等算法提升控制效率。

2.6 模糊控制算法

模糊控制^[41,49,59]具有良好的鲁棒性且不依赖精确的数学模型，对定性的逻辑规则有较强的推理能力。模糊控制常应用模糊规则来应对系统状态和控制律，因此不需要很长的计算和推理时间，控制的效率和时效性较好；模糊控制依靠系统整体的状态进行推理，不依赖精确的系统模型。

模糊控制源于实际生产生活中产生的模糊语句，如图 4 所示。其



A 为平常点 A is the normal point;B 为起始点 B is the starting point;C 为终止点 C is the end point

图 3 滑模运动点

Fig.3 Movement points of the sliding mode

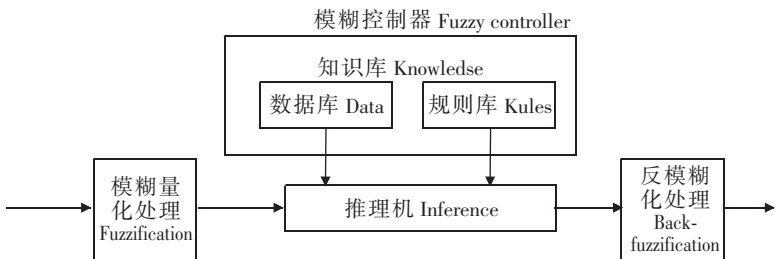


图 4 模糊控制原理图

Fig.4 The schematic diagram of a Fuzzy control

工作过程是:模糊控制系统在接收到外部的精确量信号输入后,通过模糊化处理将信号变为模糊量,经由推理机模块借助数据库和规则库进行推理和决策,输出的模糊控制量经反模糊化处理成为精确控制量^[60]。通常模糊控制的输入量为偏差值和偏差值的变化率,所以模糊控制也需要扰动观测器^[61]。

模糊控制中较为重要的问题有以下几点:

1) 模糊量的转化。将具体的数值转化为模糊判定中的规则量,需要应用隶属度函数,通常隶属度函数的确定采用统计法和专家经验法,带有较强的主观性。

2) 模糊规则的确定。模糊规则用模糊语言表征输入变量与输出变量的关系^[62]。

悬架系统具有复杂、非线性、不规则扰动等特点,使得系统精确建模的难度大大提升,由于模糊控制不依赖精确的数学模型,因此应用模糊控制对悬架姿态和性能进行控制既可以得到较好的控制效果又可以简化控制流程,提升控制环节的效率,并提高悬架系统的鲁棒性能^[63-64]。

Toshio^[65]将模糊理论与车辆悬架系统结合用于控制车身的俯仰与侧倾振动。Yagiz 等^[66]为了控制簧上质量位移而造成的悬架工作空间不足的问题,将模糊逻辑应用于判断七自由度非线性悬架速度与加速度,并结合 PID 对悬架进行控制,结果表明悬架动行程显著减小。姚嘉凌等^[67]考虑到新建立的滞回模型与实际系统之间存在误差,为减小误差对悬架控制效果的影响,同时追求控制的及时性,应用模糊控制对磁流变减振器进行控制,有效地改善了悬架整体平顺性。孔马斌等^[68]为了控制矿区运载车受高频外部扰动而造成的悬架动行程过大,且因干扰复杂多变难以获取准确动态模型的问题,设计模糊 PID 控制器对动挠度进行控制,并结合粒子群算法对参数进行优化。寇发荣等^[69]以簧载质量加速度偏差和偏差的变化率作为输入量,将控制力作为输出量,设计模糊控制器,改善了应用磁流变减振器车辆的舒适性,同时保证了车辆的操纵稳定性。

模糊控制的局限性在于模糊规则和隶属度的制定依靠实际的工程经验或参考统一标准,主观性较强,而对复杂且没有运动规律的情况,难以达到最佳的控制效果。因此模糊控制可以与自适应控制算法等控制方法结合提高对于此类工况下悬架的控制效果。

2.7 神经网络控制算法

神经网络模型通过模拟人脑神经元活动,从而实现对信息的加工、处理、存储和搜索^[70]。神经网络由大量的神经元节点和节点间相互连接的加权值组成,每个节点代表一种激励函数,通过加权的方式模拟大脑的记忆,分析输入、输出间的内在关系,对数学模型进行拟合或得出一种决策,并通过对神经元间权值的调节不断更新模型^[71-72]。

神经网络适于解决以下几种悬架领域的问题:非线性悬架系统复杂难以建立精确模型;外部激励与悬架响应之间要素过多难以总结规律;考虑多种路面输入和多种悬架性能输出的综合优化。在应对这些问题时,神经网络可以充分发挥其学习和分析能力,综合考虑多影响因素对多性能指标的影响,建立车辆模型和自适应优化控制。

Moran 等^[73]和 Nagai 等^[74]率先应用有效训练的神经网络对前悬挂系统进行状态观测,并结合逆动力学抑制后悬架外部扰动对车身的响应,实验结果表明神经网络控制可用于非线性悬架。陈无畏等^[75-76]基于二自由度 1/4 车辆动力学模型,采用神经网络观测器对复杂的路面情况和系统响应进行在线识别,采用模糊控制器进行在线控制,并将二者进行串联,使系统同时具有神经网络的自主学习能力和模糊逻辑的推理能力,最终达到振动加速度、悬架动挠度、车轮动载等方面性能的全面优化。郭大蕾^[77]采用神经网络解决磁流变阻尼器这一非线性系统的控制问题,并采用自适应控制方法优化了神经网络控制结构,从而提升了控制效率。张娇^[78]针对模糊 BP 神经网络控制器容易陷入局部最优解的问题,对模糊化层的高斯隶属函数中心参数和宽度参数采用 GA 算法进行优化,提升了算法的求解速度。

王建峰^[79]针对磁流变阻尼器力学特性影响因素较多、内部关系复杂,难以建立精确模型的特点,运用 BP 神经网络对模型进行辨识,结果表明神经网络模型可以简洁而准确地预测磁流变减振器实际阻尼力。Pang 等^[80]基于 1/4 车辆动力学模型和磁流变阻尼器的工作特性,设计了模糊神经网络控制器,

建立了 Takagi - Sugeno 模糊控制器, 使用粒子群算法优化神经网络 FNN 控制器的训练和学习过程。

神经网络虽然有较强的学习能力, 但是对已经形成模型和规律的系统问题, 仍然要从获取信息和自主建模开始, 会额外花费训练和自学习的时间, 因此如若要提升控制算法的效率, 可以融合模糊算法等进行联合优化。

2.8 遗传算法

遗传算法是基于达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说思想建立起来的^[81]。

在悬架领域遗传算法作为一种寻优策略, 常与其他控制方法结合使用, 对控制方法的各项参数进行优化, 解决参数选取不合理而造成的控制效果不佳的问题, 而不单独作为控制方法对悬架进行控制。

王启瑞等^[82]和陈无畏等^[42]分别将遗传算法和线性二次高斯 (LQG) 车辆半主动悬架控制方法、 H_{∞} 车辆半主动悬架控制方法结合, 应用遗传算法对系统的结构参数和控制参数进行了集成优化。潘筱等^[83]在非线性的三自由度汽车模型的基础上, 以高速转弯侧倾最小作为目标函数, 利用遗传算法, 对前后悬架弹性刚度和横向稳定杆的刚度进行寻优, 改善了车辆的操纵稳定性和平顺性。寇发荣等^[84]针对电动静液压 (EHA) 半主动悬架采用了 LQR 控制, 运用遗传算法对液压缸活塞有效面积等系统参数进行优化。

以上是较为常用的半主动悬架控制方法和优化方法, 从发展历程上不难看出, 随着计算机技术和智能控制的不断发展, 半主动悬架的控制算法的种类也不断增加, 所能解决的问题变得更为全面。不同的控制方法各有其优缺点和适用范畴, 针对悬架这类复杂的被控对象, 往往单一的控制方法已不足以获得最优的控制效果。因此将不同的控制方法和策略进行结合, 形成集成控制或复合控制, 才是现在和未来悬架控制研究的发展方向。例如: 将 PID 控制方法与各类控制算法方法结合^[43, 59, 68, 79, 85, 86]; 将天棚、地棚控制方法与其他控制方法结合^[22, 87-91]; 将现代控制方法与智能控制方法结合^[50, 92-95]; 不同智能控制方法之间相互结合^[39, 78, 80, 96, 97]等。

3 半主动悬架类型

可控减振器是半主动悬架控制的关键部分, 接收控制器传递的控制信号, 通过改变自身结构参数实现控制效果。可调节减振器的调节精度、响应速度、稳定性都影响着半主动悬架控制效果。精度越高、响应时间越短且拥有更大调节范围的减振器控制效果越好, 但内部结构就更为精密和复杂, 成本也相应较高。对悬架类型的选取要考虑车辆的载重、底盘空间、行驶工况等实际因素, 以充分发挥悬架的性能, 因此结合车辆的应用情况, 选用适当的减振器和悬架类型十分重要。应用可调节减振器的半主动悬架可以按照调节范畴分为有级和无级, 目前, 有级式已经渐渐不能满足控制性能的需求, 大部分可调减振器为无级式。本节介绍了几种常用的半主动可控悬架, 并匹配了较为适用的控制算法。

3.1 有级可调减振器悬架

有级可调减振器悬架通过改变控制阀的开闭, 实现减振器阻尼在不同的离散值之间进行快速切换, 一般切换时间为 10 ~ 20 ms。有级可调减振器结构相对简单, 有一定的可调节性, 因此适用于道路平缓单一的行驶条件, 在半主动悬架发展早期常与天棚、地棚控制方法结合使用。

但是有级式可调减振器只有有限个离散的调节值, 所以对行驶路况和道路条件变化适应能力不足, 往往需要依靠驾驶员的经验和对道路的判断进行调节。因此未来发展方向应是增加阻尼可调节的档位数以及缩短切换档位的速度, 同时提升自主切换模式的能力^[98]。

3.2 无级可调减振器悬架

目前大部分半主动悬架控制都是无级可调减震器悬架, 具有一定范围内结构参数连续变化的优点。相比于有级式, 无级式具有更高的调节精度, 并且具有更大的调节范围, 可以与控制算法配合, 使车辆具有适应路面变化和结构改变的能力。无级可调可以按照工作原理分为: 节流孔径调节悬架、电 (磁) 流变减振器悬架、空气悬架和油气悬架。

3.2.1 节流孔径调节悬架

节流孔径调节悬架主要是通过改变节流孔的大小, 从而改变液体通过节流孔时产生的阻尼力, 同时产生压力损失耗散能量。孔径越小, 阻尼力越大, 悬架的阻尼系数也就越大。通常会采用电子控制节流阀, 通过步进电机驱动减振器的阀杆调节节流阀的通流面积, 以此实现在一定范围内阻尼连续变化。

郭洪文^[99]针对双筒式两态液压减振器, 在工作缸与储油缸之间添加一个带有电磁阀的中间缸, 通过对电磁阀脉冲电压和占空比的调节, 使阻尼连续可调, 如图 5 所示。此类减振器的局限性在于: 节流阀结构复杂, 振动冲击与噪声较大, 且要求精度高, 制造成本较高。减振器中使用的液压油通常可压缩性不强, 因此悬架刚度并不会发生太大改变, 对路面的适应能力不强。此类悬架可以配合最优控制或应用模糊控制对综合性能进行提升。

3.2.2 电（磁）流变液体减振器悬架

电流变液体可以在电场作用下或者静止状态下呈现极大的液体粘度, 或通过调节外加电场在极短的时间从液态转换为固态, 且转换可逆, 这种效应被称为电流变效应^[100]。

磁流变液体是一种可随外部磁场变化而改变其流变性质的液体功能材料, 主要表现在剪切应力可变, 且转换可逆。通过对外部磁场的控制, 可以在极短的时间内改变流变力学性质。

电（磁）流变减振器悬架将两种液体作为减振器的工作液, 随路面情况和结构参数的变化改变液体的性质, 以及减振器的阻尼和刚度, 从而实现悬架性能无级连续可调, 不需要开度可变结构复杂的节流阀, 结构也会更为简单。磁流变液体响应时间稍长, 但是其剪切应力大很多, 同时有着更好的稳定性, 相比于电流变液体更能满足减振性能要求, 所以被更多地应用在半主动悬架减振器中^[101]。

电流变、磁流变减振器工作原理基本一致, 以磁流变减振器为例, 对其三种工作模式的原理进行介绍, 如图 6 所示。其中: Q 表示工作液的流量; F_n 表示减振器所受外力。

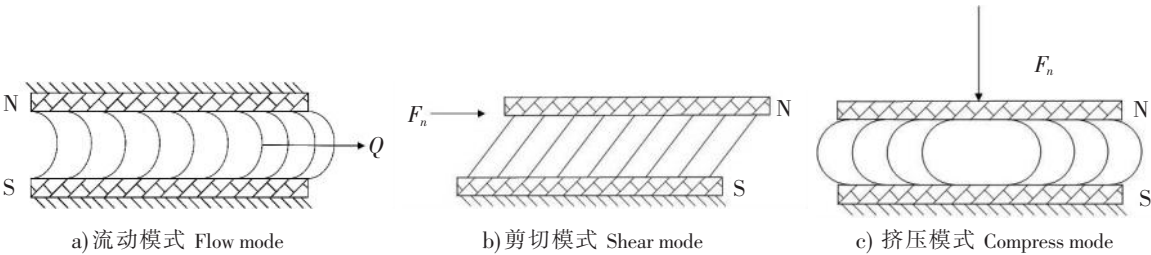


图 6 磁流变减振器工作模式示意图

Fig.6 Schematic diagram of the working mode of the magnetorheological damper

流动模式: 上下极板固定, 工作液在外加磁场的作用下在极板间流动, 通过改变励磁线圈的电流大小, 从而改变输出阻尼力。此时工作液粘度较高, 可以提供较大的阻尼力, 但可调节范围较小。

剪切模式: 工作液在外加磁场的作用改变了流动性, 两个极板运动产生剪切力以及摩擦力, 从而改变输出阻尼力。此时减振器可调节范围大, 但只能提供较小的阻尼力。

挤压模式: 两极板相互接近或远离, 使得工作液在极板运动垂直方向上运动, 工作液在外加磁场的作用改变了流动性, 从而改变输出阻尼力。此模式虽然可以提供较大阻尼, 但在实际应用中减振器位移较大, 不适用挤压模式。

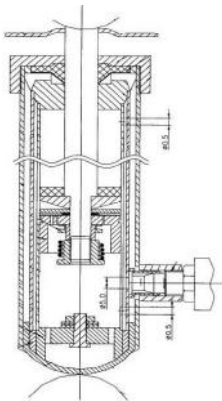


图 5 电磁阀控制的减振器结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the damper controlled by the magnetic valve

目前磁流变减振器已有较为成熟的商业化产品,但针对其控制方法仍是研究热点之一。寇发荣等^[102-103]对磁流变减振器特性进行了分析,结合天-地棚混合阻尼控制方法,对电流进行控制,减小了悬架动挠度和轮胎动载荷。

磁流变减振器悬架因其响应时间短、控制简单、耗能低且调节范围大,适用于需要良好瞬变操控性的车辆,如 Audi TT 与法拉利 559GTB Fiorano 等车型上已安装此类减振器;因其具备抑制俯仰和侧倾的能力,也适用于中型载货汽车或体积较大的豪华轿车。磁流变液的制备要求较高,所以成本较高。由于此类悬架在单一平缓工作环境下不能够充分发挥磁流变减振器悬架的性能,因此并不推荐用在城市通勤车或小型乘用车上。

基于磁流变能够较快的响应控制信号且调节范围广的特点,可以与滑模控制或神经网络控制结合达到更为精确和全面的控制效果;也可以与模糊控制结合,使控制效率更高。

3.2.3 空气悬架

空气悬架由空气弹簧和可调节高度阀组成,根据结构主要可以分为三种形式,如图 7 所示。

1) 空气弹簧代替螺旋弹簧与减振器并联,如图 7a) 所示,其调节范围不大,适用于在城市路段行驶的车辆;

2) 空气弹簧代替减振器与螺旋弹簧并联,如图 7b) 所示,一般用于改装车;

3) 空气弹簧与减振器串联,如图 7c) 所示,是现在应用最多的一种形式,具有可调范围大,适用范围广的特点^[104]。

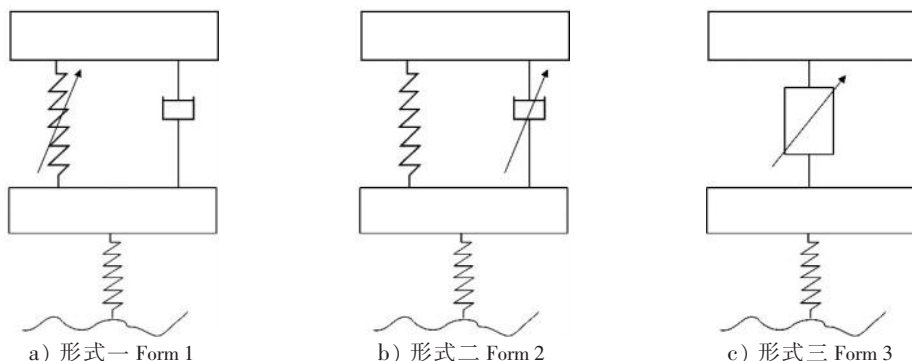


图 7 空气弹簧的三种形式

Fig.7 Three types of the air spring

汪若尘等^[105]设计了半主动空气悬架系统通过一种转阀式阻尼调节机构来实现阻尼可调,采用模糊控制方法进行半主动控制。蔡锦康^[106]应用七自由度半主动空气悬架模型,采用粒子群算法,结合三种路况环境,对初始状态空气弹簧的压强组合进行优化,改善了车辆的平顺性。

空气悬架质量轻,结构简单,固有频率低,阻尼和刚度可调,适用于半主动悬架控制。该类悬架可以隔离噪声和振动,保持恒定的悬架高度,从而保证车辆良好的平顺性和舒适性。但其反应时间较长,精度较低,对气囊密封性要求较高,在体积、成本和环保性等方面较其他悬架有较大的劣势^[107-109],所以更适用于体积较大的商用车和道路运载车,而不适用于环境复杂的工程车辆。国外中大型客车、医疗救护车对于空气悬架的应用率已达到 100%,载货车应用率也很高,在某些高档轿车上也有一定的应用;国内也有很多载客运输车装配了空气悬架,以提升乘坐舒适性。

因空气悬架反应时间较慢且只适用于较为平缓路面,因此,需要配合模糊控制算法对车身姿态等方面进行控制,也可应用天棚、地棚控制以及最优控制融合算法进行综合特性控制。

3.2.4 油气悬架

油气悬架由蓄能器和悬架油缸组成,通过油液传递压力,以惰性气体作为弹性介质。可调控油气悬架采用单向阀、可调节节流阀等部件代替传统的减振器部件。油气悬架具有良好的非线性、刚度渐

增（减）可变特性和减振特性，能够较好地提升车辆的平顺性和操纵稳定性。

按照整体构型来划分，油气悬架可以分为独立式和互联式，如图 8 所示。互联式油气悬架各缸通过油管相互连接，气腔之中的气体压强可以保持不变，从而自动平衡轴荷^[110]。

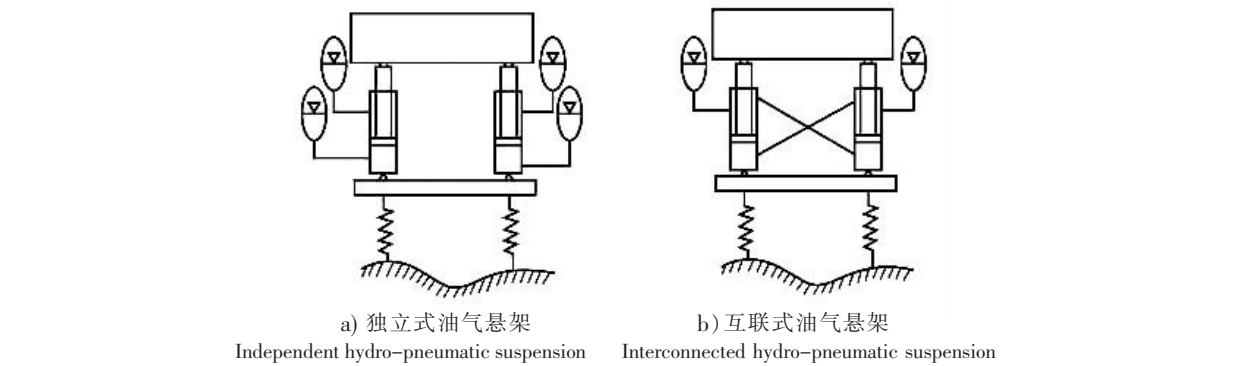


图 8 不同整体构型油气悬架

Fig.8 Hydro-pneumatic suspensions with different overall configurations

从油气悬架的气室数量来划分，可以分为单气室、双气室、两级压力室等等。单气室和双气室均采用惰性气体作为弹性元件以缓冲振动，液体通过节流孔产生的阻尼力可以衰减振动。相比于单气室，双气室油气悬架能够提供足够大的阻尼力，避免因阻尼力不足且行程较大引起的活塞与缸壁上段发生碰撞。双气室油气悬架具有多种布置形式可以适应不同的应用范畴^[111]，如图 9 所示。

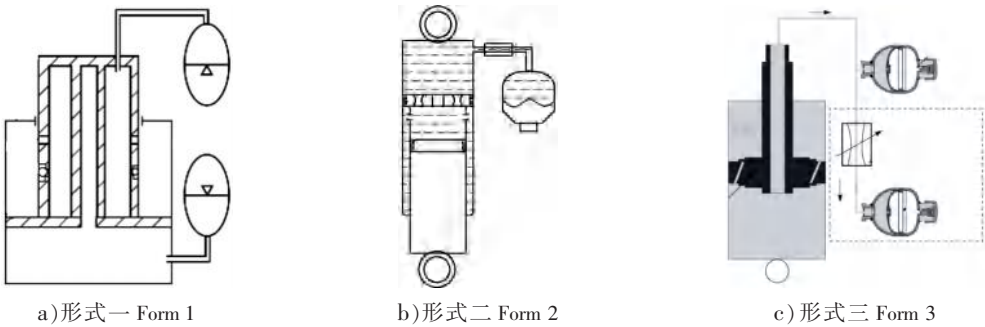


图 9 不同形式的双气室油气悬架

Fig.9 Different forms of the dual-chamber hydro-pneumatic suspension

双气室油气悬架的特点：1）结构较为简单，在传统的结构基础上增加了一组弹性器件和阻尼，使其具有变刚度和变阻尼；2）继承了传统油气悬架的非线性渐增（减）刚度可变特性；3）使得悬架系统拥有更为灵活的调节范畴和能力，在不同的频率段可以实现不同的刚度和阻尼特性。

王勋等^[112]为了满足重型汽车在不同工况下对悬架刚度的需求，设计了一种蓄能器参数不同的双气室油气悬架。桑志国等^[113-114]通过对双气室油气悬架的建模和分析，应用遗传算法对悬架性能进行多目标优化，采用谐波平衡法推导出等效刚度和等效阻尼的表达式。

油气悬架承载能力强，吸收振动效果明显，相比于空气悬架，元件的可靠性更好；单位储能比大，所以在满足承载要求的前提下，体积较小。但是由于采用液压油缸，重量相对较重，对油缸、蓄能器的密封性要求较高。该悬架适用于大型运载车辆或者在恶劣环境下工作的工程车辆，如：大吨位工程运载车辆、越野车辆、乡村道路载货汽车、履带或轮式军用车辆。

油气悬架与半主动控制策略结合是目前研究热点之一^[115], 可以与模糊控制算法结合弥补节流孔径调节时间较长的弱点, 也可以应用神经网络优化复杂工作环境对悬架性能的影响。

4 展望与发展

1) 结合智能算法进行预先控制。目前悬架控制主要还是在外部情况对车辆本身产生影响之后, 通过观测车辆参数的变化来进行调节, 虽然随着 ECU 的发展可以将这种滞后时间尽可能缩小, 但控制效果仍然有限。未来的发展趋势是与高速发展的人工智能技术结合, 对行驶路况和车身变化进行预测, 在外部扰动对车辆产生影响前对车辆的参数进行优化调整, 进而最大程度地消除扰动和路况对车辆平顺性、操纵稳定性的影响。

2) 车辆各系统之间的集成控制。车辆的悬架、制动、转向等各个系统之间相互影响, 对各个系统集成控制需要对车辆的各项性能指标和控制目标做出一个总体考虑和综合优化策略。微处理器、高性能计算机和智能算法的高速发展为集成控制提供了条件, 车身控制器和传感器的共同利用不仅可以降低成本, 还可以在一定程度降低系统之间的相互影响, 提高车辆的综合性能。

3) 车辆动力学仿真研究。要有效运用 ADAMS、Carsim 等动力学仿真软件建立半主动悬架车辆动力学模型, 在不同路况、不同工况下进行模拟, 充分研究不同控制方法对减振环节的影响, 考察系统的非线性、随机性和稳定性, 再结合实车进行试验, 最终确定最优的控制策略与方法。

5 结语

半主动悬架可以有效的改善车辆的平顺性和操纵稳定性, 同时可以控制成本。选取恰当的悬架类型并搭配相应的控制算法可以实现半主动悬架控制的最优设计, 提升整体车辆的性能。而随着智能技术的发展和硬件工艺水平的不断提高, 半主动控制器的精度和计算能力会不断增强, 控制效率会逐渐提高, 悬架控制终端实现控制策略的能力不断增强, 控制方法和控制终端之间的整合程度也会不断提升, 悬架的性能越来越好。

[参 考 文 献]

- [1] 任勇生, 周建鹏. 汽车半主动悬架技术研究综述 [J]. 振动与冲击, 2006(3): 162-165.
- [2] 张进秋, 黄大山, 刘义乐. 改进的地棚半主动控制算法及其性能分析 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45(4): 84-89.
- [3] 来飞, 胡博. 汽车主动悬架技术的研究现状 [J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2019, 43(4): 518-526.
- [4] 贾永枢, 缪阿海. 四自由度汽车磁流变半主动悬架最优控制研究 [J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1818-1824.
- [5] 盛云, 吴光强. 7 自由度主动悬架整车模型最优控制的研究 [J]. 汽车技术, 2007(6): 12-16.
- [6] 潘成龙, 荣吉利, 项大林, 等. 9 自由度主动悬架平顺性研究 [J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(10): 1012-1017.
- [7] 张磊, 张进秋, 罗涛, 等. 车辆悬架系统性能综合评价方法研究 [J]. 汽车工程, 2016, 38(12): 1494-1499.
- [8] KARNOPP D K, CROSBY M J, HARWOOD R A. Vibration control using semi-active force generators [J]. Journal of Engineering for Industry, 1974, 96(2): 619-626.
- [9] 张磊, 张进秋, 彭志召, 等. 车辆半主动悬架改进型天棚阻尼控制算法 [J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 931-935.
- [10] 张进秋, 黄大山, 刘义乐. 改进的地棚半主动控制算法及其性能分析 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45(4): 84-89.
- [11] 严天一, 刘大维, 师忠秀, 等. 基于地棚控制的半主动悬架车辆道路友好性仿真 [J]. 农业机械学报, 2007(1): 12-16.
- [12] BENLAHCENE Z, FARIS W F, IHSAN S I. Optimisation and control of semi-active suspension using genetic algorithm for off-road full vehicle [J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2014, 9(3/4): 372-382.

- [13] 郭孔辉, 隋记魁, 郭耀华. 基于天棚和地棚混合阻尼的高速车辆横向减振器半主动控制 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(2): 18-23.
- [14] 翁建生, 张文丰, 胡海岩, 等. 时滞“天棚”阻尼控制的车辆悬架系统特性研究 [J]. 南京建筑工程学院学报, 1999(3): 1-6.
- [15] 彭志召, 张进秋, 张雨, 等. 车辆半主动悬挂的频域控制算法 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(4): 36-42.
- [16] 张杨, 周武能, 潘亮, 等. 基于天棚控制算法的磁流变半主动控制系统研究 [J]. 微型机与应用, 2016, 35(9): 6-7.
- [17] 李健, 杨建, 柴星, 等. 车辆半主动悬架分数阶天棚阻尼控制器设计 [J]. 机械研究与应用, 2018, 31(5): 140-144.
- [18] 兰波, 喻凡. 车辆主动悬架 LQG 控制器的设计与仿真分析 [J]. 农业机械学报, 2004(1): 13-17.
- [19] POUSSOT V C, SPELTA C, SENAME O. Survey and performance evaluation on some automotive semi-active suspension control methods: a comparative study on a single-corner model [J]. Annual Reviews In Control, 2012, 36(1): 148-160.
- [20] 么鸣涛, 李钊, 顾亮. 基于微分几何法的半主动油气悬架 LQR 控制 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(5): 519-523.
- [21] 陈杰平. 基于磁流变减振器的汽车半主动悬架设计与控制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [22] 张进秋, 彭虎, 张建, 等. 车辆悬挂 LQR 主动控制权矩阵权重参数优化 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 214-219.
- [23] GOMES H M. Multi-objective optimization of quarter car passive suspension design in the frequency domain based on PSO [J]. Engineering Computations, 2016, 33(5): 1422-1434.
- [24] 王一凡. 基于混合蛙跳算法的半主动悬架 LQG 控制器设计 [J]. 时代汽车, 2018(10): 97-100.
- [25] ZAMES G. Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations multiplicative seminorms and approximate inverse [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1981, 26(2): 301-320.
- [26] DOYLE J C, GLOVER K, KHARGONERKAR P P. State space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems. [J]. IEEE Transactions on Automatic control, 1989, 34: 831-847.
- [27] 陈本美, 席斌. H_∞ 控制及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 345.
- [28] CHOI H D, AHN C K, LIM M T. Dynamic output-feedback H_∞ control for active half-vehicle suspension systems with time-varying input delay [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(1): 59-68.
- [29] RIGATOS G, SIANO P, WIRA P. Nonlinear H-infinity control of multi-phase electric machines [J]. IFAC-PapersOn-Line, 2016, 49(27): 109-115.
- [30] TAKAHASHI M, HIRAOKA S, SUZUKI T. Gain-scheduling H_∞ control to improve ride comfort and driving stability for vehicle active suspension [J]. Vehicle Engineering, 2014, 2: 21-30.
- [31] JING H, WANG R R, LI C. Robust finite-frequency H_∞ control of full-car active suspension [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 441: 221-239.
- [32] RIZVI S M H, ABID M, KHAN A Q, et al. H_∞ control of 8 degrees of freedom vehicle active suspension system [J]. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2018, 30(2): 161-169.
- [33] 傅志方, 张志谊, 华宏星. 半主动悬架控制的 H_∞ 方法 [J]. 振动工程学报, 1999(1): 35-41.
- [34] FUJITA T, FUKAO T, KINOSHITA T, et al. Semi-Active suspension improving both ride comfort and handling feel [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 225-230.
- [35] YAMASHITA M, FUJIMORI K, HAYAKAWA K, et al. Application of H_∞ control to active suspension systems [Z]. Sydney Australia, IFAC 12th Triennial World Congress, 1993: 87-90.
- [36] LOZOYA-SANTOS J D, MORALES-MENENDEZ R, RAMIREZ-MENDOZA R A, et al. Adaptive semi-active suspension design using gain-scheduling [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(2): 845-850.
- [37] LIU H, NONAMI K, HAGIWARA T. Active following fuzzy output feedback sliding mode control of real-vehicle semi-active suspensions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(1/2): 39-52.

- [38] AUBOUET S, DUGARD L, SENAME O, et al. Semi-active H_{∞} /LPV control for an industrial hydraulic damper [C]. Budapest: Proceeding of the European Control Conference, 2009.
- [39] STROHM J N, CHRIST F. Preview H_{∞} control of a hybrid suspension system [J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(5): 237-242.
- [40] 段建民, 黄小龙. 汽车主动悬架 H_2/H_{∞} 多目标优化控制 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2019, 38(5): 30-35.
- [41] MRAZGUA J, TISSIR E H, OUAHI M. Fuzzy fault-tolerant H_{∞} control approach for nonlinear active suspension systems with actuator failure [J]. Procedia Computer Science, 2019, 148: 465-474.
- [42] 陈无畏, 王启瑞, 朱婉玲. 基于遗传算法和 H_{∞} 控制的悬架系统集成设计 [J]. 振动工程学报, 2003(2): 11-16.
- [43] 金耀. 自适应单神经元智能控制策略及其在汽车主动悬架中的应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [44] SAVAS Y, BASTURK H I. Adaptive backstepping control design for active suspension systems actuated by four-way valve-piston [C]. Washington: IEEE American Control Conference, 2017.
- [45] HUA C, CHEN J, Li Y, et al. Adaptive prescribed performance control of half-car active suspension system with unknown dead-zone input [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 111: 135-148.
- [46] YU W H, ZHANG X J. Adaptive real-time estimation on road disturbances properties considering load variation via vehicle vertical dynamics [J]. Mathematic Problem in Engineering, 2013: 1-9. DOI:10.1155/20131283528.
- [47] 方敏, 王峻, 陈无畏. 汽车半主动悬架的自适应 LQG 控制 [J]. 汽车工程, 1997, 19(4): 200-205.
- [48] 陈无畏, 王国美, 肖寒松, 等. 农用运输车悬架系统的自适应控制 [J]. 农业机械学报, 1997(4): 19-23.
- [49] MA X, YANG S. Self-adapt fuzzy control of a semi-active suspension of high-speed locomotive with MR dampers [C]. Kunming: International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2008, 4: 2120-2124.
- [50] 王新, 孙丽颖. 半主动悬架的自适应滑模控制 [J]. 辽宁工业大学学报 (自然科学版), 2017, 37(5): 296-301.
- [51] UTKIN V. Variable structure systems with sliding modes [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- [52] 胡凯. 自适应滑模控制原理及其应用研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [53] Qi N Z, XIONG F, DING Q. Multi-objective optimal design of sliding mode control with parallel simple cee mapping method [J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(1): 46-54.
- [54] PLATIN B E, CHANG J, OLGAC N. An application of variable structure systems with sliding mode control to a remotely operated vehicle [J]. Control of Cars, Ships and Engines, 1990, 23(8): 411-417.
- [55] 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(4): 69-74.
- [56] 赵成, 胡增荣, 陈大跃. 半主动悬架的滑模变结构控制 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 109-114.
- [57] 王乃洲. 基于分数阶微积分理论的滑模变结构控制 [D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [58] 陈炎冬, 许轰烈, 陈宁. 含分数阶指数趋近律的变结构控制悬架研究 [J]. 控制工程, 2018, 25(2): 323-328.
- [59] 王靖岳, 王浩天, 张勇. 基于模糊 PID 控制的汽车主动悬架研究 [J]. 机械科学与技术, 2009, 28(8): 1047-1051.
- [60] 胡茹. 浅谈模糊控制原理及应用 [J]. 科技风, 2019(2): 19-20.
- [61] YOSHIMURA T, TERAMURA I. Active suspension control of a one-wheel car model using single input rule modules fuzzy reasoning and a disturbance observer [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE, 2005, 6A(4): 251-256.
- [62] TALIB M H N, IBRAHIM Z, RAHIM N A, et al. An improved simplified rules fuzzy logic speed controller method applied for induction motor drive [J]. ISA Transactions, 2020, 105: 230-239. DOI:10.1016/j.isatra.2020.05.040.
- [63] FARGIONE G, TRINGALI D, RISITANO G. A fuzzy-genetic control system in the ABS for the control of semi-active vehicle suspensions [J]. Mechatronics, 2016, 39: 89-102.
- [64] KURCZYK S, PAWECZYK M. Fuzzy control for semi-active vehicle suspension [J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2013, 32(3): 217-226.
- [65] TOSHIO Y. Active suspension of vehicle system using fuzzy logic [J]. International Journal of Systems Science, 1996, 2: 215-219.
- [66] YAGIZ N, SAKMAN L E. Fuzzy logic control of a full vehicle without suspension gap degeneration [J]. International

Journal of Vehicle Design, 2006, 42(1/2): 198-212.

- [67] 姚嘉凌, 郑加强, 易捷. 滞回模型磁流变减振器半主动悬架模糊控制 [J]. 机械设计与研究, 2008(5): 51-54.
- [68] 孔马斌, 李伟平, 陶建建. 矿用自卸车油气悬架模糊 PID 控制研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(11): 167-173, 357.
- [69] 寇发荣, 刘攀, 张冬冬. 汽车磁流变半主动悬架控制策略对比研究 [J]. 机械设计与制造, 2015(7): 70-73.
- [70] FREDERIC B F, REVIEW H D, LANDAHL W S. McCulloch, walter pitts, a statistical consequence of the logical calculus of nervous nets [J]. Journal of Symbolic Logic, 1944, 9(2): 50.
- [71] 汪镭, 周国兴, 吴启迪. 人工神经网络理论在控制领域中的应用综述 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2001, 29(3): 357-361.
- [72] MILOVANOVIC M B, ANTIC D S, MILOJKOVIC. Adaptive PID control based on orthogonal endocrine neural networks [J]. Neural Networks, 2016, 84: 80-90.
- [73] MORAN A, NAGAI M. Optimal rear suspension preview control of nonlinear vehicles using neural networks [J]. IFAC Proceedings Volumes, 1993, 26(2, Part 3): 83-86.
- [74] NAGAI M, MORAN A, TAMURA Y, et al. Identification and control of nonlinear active pneumatic suspension for railway vehicles, using neural networks [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(8): 1137-1144.
- [75] 陈无畏, 王志君, 范迪彬. 汽车半主动悬架的神经网络自适应控制 [J]. 汽车工程, 1998(1): 31-36.
- [76] 陈无畏, 朱敏杰, 王启瑞, 等. 基于串联型模糊神经网络的汽车半主动悬架的研究 [J]. 汽车工程, 2000(2): 104-108.
- [77] 郭大蕾. 车辆悬架振动的神经网络半主动控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- [78] 张娇. 基于 GA 的半主动悬架模糊神经网络控制研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [79] 王剑锋. 磁流变减振器结构优化及半主动悬架控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [80] PANG H, LIU F, XU Z. Variable universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension system with MR damper combining fuzzy neural network and particle swarm optimization [J]. Neurocomputing, 2018, 306: 130-140.
- [81] 吉根林. 遗传算法研究综述 [J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69-73.
- [82] 王启瑞, 朱婉玲, 陈无畏, 等. 基于遗传算法和 LQ 控制的汽车半主动悬架结构和控制参数的集成优化研究 [J]. 汽车工程, 2002, 24(3): 236-240.
- [83] 潘筱, 陈潇凯, 林逸, 等. 基于遗传算法的汽车平顺性和操纵稳定性优化 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(11): 1638-1642.
- [84] 寇发荣, 杜嘉峰, 王哲, 等. 电液半主动馈能悬架非线性建模与协调性优化 [J]. 中国机械工程, 2017, 28(14): 1701-1707.
- [85] RAO K D. Modeling, simulation and control of semi active suspension system for automobiles under MATLAB simulink using PID controller [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(1): 827-831.
- [86] 郭全民. 阻尼连续可调的汽车磁流变半主动悬架控制方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [87] 彭虎, 张进秋, 张雨, 等. 考虑能控特性的天棚阻尼半主动控制算法性能分析 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(3): 66-71.
- [88] 彭虎, 张进秋, 张雨, 等. 考虑能控特性的天棚阻尼半主动控制算法性能分析 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(3): 66-71.
- [89] 孙晋伟, 秦也辰, 王振峰, 等. 基于路面识别的非线性悬架系统自适应控制 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39(9): 1299-1303.
- [90] 张进秋, 张磊, 彭志召, 等. 车辆悬架联合反馈半主动控制算法 [J]. 汽车工程, 2015, 37(9): 1022-1028.
- [91] 寇发荣, 景强强, 马建, 等. 电磁混合主动悬架内分泌复合天地棚控制研究 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39(10): 1615-1623.
- [92] 汪若尘, 丁彦姝, 孙东, 等. 基于路面激励自适应的液电馈能悬架动力学性能协调控制 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 55-64.
- [93] 张亮修, 杨家颖, 吴光强. 考虑侧倾的半主动悬架与电子稳定控制系统集成控制 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2016, 44(3): 402-410.

- [94] 张亮修, 王宇, 吴光强, 等. 汽车阻尼可调半主动悬架混杂模型预测控制 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 156-164.
- [95] SHI K, YUAN X, LIU L. Model predictive controller-based multi-model control system for longitudinal stability of distributed drive electric vehicle [J]. ISA Transactions, 2018, 72: 44-55.
- [96] 刘爽, 李硕, 赵丁选, 等. 主动油气悬架电液伺服系统的自适应滑模控制 [J]. 燕山大学学报, 2019, 43(6): 477-484.
- [97] 陈长征, 贺东宇, 左秋阳, 等. 汽车半主动悬架神经模糊融合网络控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(2): 170-175.
- [98] 郭洋. 车用可调阻尼减振器的研制 [D]. 成都: 西华大学, 2007.
- [99] 郭洪文. NJ2045 越野车可调减振器的研制和半主动悬架设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [100] 庞雪蕾, 唐芳琼. 电流变液体的研究进展 [J]. 化学进展, 2004, 16(6): 849-857.
- [101] 翁建生, 胡海岩, 张庙康. 磁流变液体的流变力学特性试验和建模 [J]. 应用力学学报, 2000(3): 1-5.
- [102] 寇发荣, 陈龙, 张武, 等. 自供能量式磁流变半主动悬架特性研究 [J]. 液压与气动, 2016(11): 10-14.
- [103] 寇发荣, 陈龙, 张传伟, 等. 汽车磁流变半主动悬架混合天棚控制仿真 [J]. 机械设计与制造, 2017(7): 232-236.
- [104] 张晓磊. 空气悬架动力学特性及其半主动控制策略研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2015.
- [105] 汪若尘, 陈龙, 张孝良, 等. 车辆半主动空气悬架系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 6-9.
- [106] 蔡锦康. 基于改进粒子群算法的半主动空气悬架系统参数优化研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [107] 叶光湖, 吴光强. 汽车磁流变减振器半主动空气悬架仿真研究 [J]. 汽车工程, 2015, 37(5): 560-565.
- [108] 王朝. 气缸型空气悬架性能分析及控制策略研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [109] ZHU H, YANG J, ZHANG Y. Modeling and optimization for pneumatically pitch-interconnected suspensions of a vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 432: 290-309.
- [110] SOLOMON U, PADMANABHAN C. Semi-active hydro-gas suspension system for a tracked vehicle [J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(3): 225-239.
- [111] TANG B, BRENNAN M J. A comparison of two nonlinear damping mechanisms in a vibration isolator [J]. Journal of Sound And Vibration, 2013, 332(3): 510-520.
- [112] 王勋, 陈思忠. 双气室油气平衡悬架的设计 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 475-478.
- [113] 桑志国, 董明明, 秦也辰, 等. 双气室油气悬挂建模与特性研究 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(4): 401-405.
- [114] 桑志国, 董明明, 赵凯, 等. 双气室油气悬挂特性研究 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(5): 499-504.
- [115] CHEN Z, ZHANG L, YEUNG R W. Analysis and optimization of a dual mass-spring-damper (DMSD) wave-energy convertor with variable resonance capability [J]. Renewable Energy, 2019, 131: 1060-1072.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)