

车辆半主动悬架智能控制方法研究现状

张 玮

身份证号码 3212841988****0237

【摘要】 车辆半主动悬架起着稳定车身结构、提升车辆舒适性的重要作用。它结构简单、拓展性强、无需能量维系，不仅具备达到主动悬架功能效果的资质，更具有超越主动悬架、成为车辆主流结构的潜力。学界的研究热潮由此而来，研究热点之一便是控制方法的研究。本文重点介绍模糊PID算法、容错控制与最优控制3个方面的研究成果，以期对相关研究提供理论参考。

【关键词】 半主动悬架；智能控制；研究现状

引言：半主动悬架系统的设计工作能够大幅提升其作用效果，使其实现与主动悬架近似的减振性能。技术的飞速发展进步使得该领域展现出极快的技术革新速度，原本应用较为广泛的天棚控制算法、地棚控制算法、神经网络算法已逐渐被其它新兴智能控制方法取代，下文将要提及的技术为该领域中时效性最高、应用潜力最大的3种智能控制技术。

1 车辆半主动悬架系统概述

车辆悬架系统是一种介于车身与车轮之间的支撑结构，能够实现消化外部环境干扰和内部其它设施干扰的效果。它由弹簧类器件、阻尼器和导向设施构成，会在各类车辆中展现出不同的性能特点。悬架的基本结构较为类似，如图1所示。

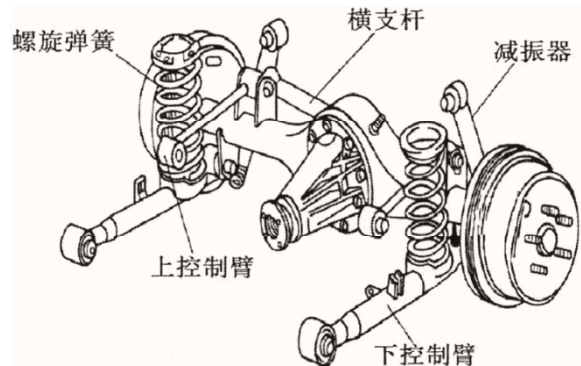


图1 车辆悬架系统的基本结构

以车辆悬架系统的控制方作为划分标准，悬架可被划分为被动式悬架、半主动式悬架与全自动悬架三种。各类结构的主要结构图如图2所示，a, b和c三个示意图分别对应三种不同的悬架结构。

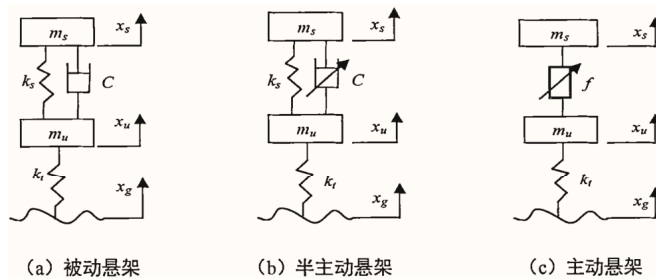


图2 车辆悬架类型

图中： m_s 为簧载质量； m_u 为非簧载质量； k_s 为弹簧刚度， k_t 为非簧载刚度， c 为阻尼系数， x_s 为簧载位移， x_u 为非簧载位移； x_g 为路面激励； f 为力作用器 [1]。

半主动悬架系统的主要特点是把控弹簧器件的刚度和阻尼系数，把控力度根据车身振颤程度的变化呈现出针对性反应，既能够实现悬架参数的调整，也能够实现结构建造工艺和结构节能效率这两个质量的同步提升。国内外对该技术的研究热度较高，下文将具体介绍不同研究者的研究进展，以此分析该技术的发展现状。

2 车辆半主动悬架系统智能控制方法研究现状

2.1 模糊PID算法研究

比例微积分算法 (proportion integration differentiation, PID) 是控制汽车半主动悬架的常用方法之一，多年来许多学者和研究组对该方法进行了研究。PID算法的数学表达式为：

公式中的 K_P 、 K_I 、 K_D 是该算法中的参数， $e(t)$ 为反馈常量， $u(t)$ 为最终输出的调整值。PID算法控制的参数一般可由人工操作进行控制，会在控制环节将其设定为固定值，如果该固定值发生了变化，则会导致振动控制效果大幅下降的情况。为优化汽车行驶过程中的平稳性和舒适度，刘晓昂等 [2] 在PID算法的基础将其改进为模糊PID算法，试图解决固定值变化引起的控制效果降低问题。刘晓昂现对半主动悬架系统开展了动力学分析，得出了车身与轮胎的振动微分方程、空间状态方程与路面激励模型，以此为基础数据模型设计了模糊PID控制器，并对其进行了仿真模型的建立与验证，由此认为PID算法控制的半主动悬架会受不可调整的PID参数的影响展现出不良的减振质量。该研究改进后的模糊PID算法可有效抑制垂直方向上的振动，消除车

辆驾驶时路面对车身的冲击,有效提升车辆稳定性。该研究的创新点在于模糊 PID 控制器的设计,其工作原理如图 3 所示。

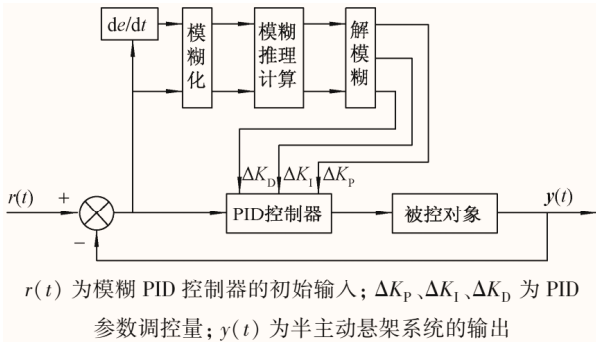


图 3 模糊 PID 控制原理

2.2 容错控制研究

容错控制是半主动悬架系统研究的另一研究热点,它具体指控制系统对机械内部故障事件的反应与控制,令控制系统可在故障与非故障两种状态下都能发挥出较好的控制性能。半主动悬架系统容错控制的具体研究方式较为多样,包括滑膜观测器诊断法、线性变参数控制算法^[3]、自适应模糊观测器、Kalman 滤波器^[4]等。其中,最新的研究成果为姚行艳^[5]设计的基于自适应模糊控制技术的容错控制。该成果的主要研究目的为解决半主动悬架的增益故障问题。为此,她将系统运动规律简化为 2 自由度的 1/4 汽车悬架模型(如图 4 所示),得出车辆半主动悬架的动力学方程与空间方程,基于自适应模糊控制设计自适应模糊控制器(

结构如图 5 所示),设定量化因子、比例因子与模糊控制器的控制规则,设计容错控制器用以控制故障,最终通过 Matlab 与 Simulink 技术搭建了路面仿真模型,验证了该研究成果的控制效果,证明自适应模糊控制模式的容错控制与防振能力都更为优秀,具备较高的推广价值。

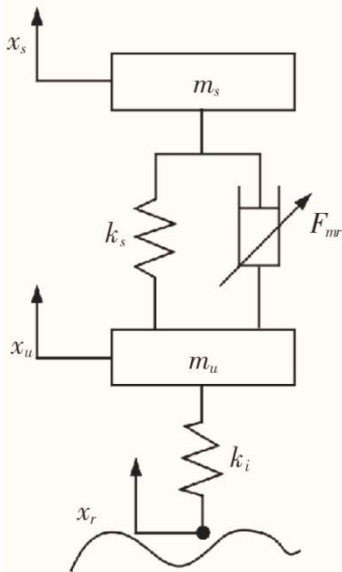


图 4 2 自由度 1/4 汽车悬架模型

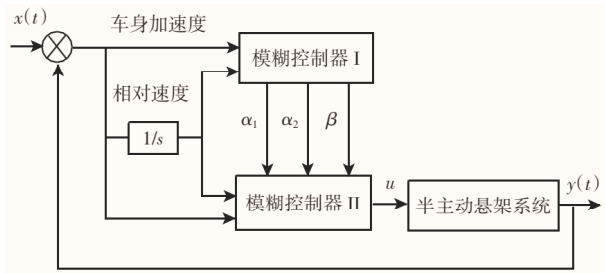


图 5 自适应模糊控制器结构

2.3 最优控制研究

最优控制是一个偏向于算法研究的研究方向,其核心研究内容不在于结构或模型的设计,而在于控制算法的设计。近三年来,各国研究人员都设计了许多算法用以控制半主动悬架系统,例如神经网络控制算法、天棚控制算法和 H_∞ 算法。但这些算法虽都在结果上体现了对控制效果的改善效果,但都存在许多难以根除的问题,例如天棚控制并未实现提升车辆稳定性的效果、 H_∞ 算法会在模型参数变化时出现鲁棒性能的大幅降低现象。贾永枢^[6]等以 1/2 车辆半主动悬架模型为例,探究该问题的最优控制算法。他们的前几个步骤与其他研究团队相似,都以建立动力学方程与空间方程为起始,建立半主动悬架仿真模型,设计仿真模型与半主动悬架 LQR 最优控制器,将最优控制算法应用于 LQR 最优控制器的分段过程中。其中,可控最优阻尼力 (U)、增益矩阵 (K) 的计算公式分别为:

$$U = -KX(t)$$

$$K = BTP + NT$$

$$PA + ATP - (PN + N)R^{-1}(BTP + NT) + Q = 0$$

3 结论

上述三项研究成果的研究方法较为相似,均采用建立动力学方程与空间方程、设计控制器或控制算法、建立悬架仿真模型、仿真分析与验证等步骤,区别之处主要在于控制器与控制算法的设计、仿真模型的设计与建立。经初步分析可知,当前的研究热点主要集中在算法设计中,模糊 PID 算法与最优 LQR 算法均在验证中展现出了较好的减振性能,具备较高的推广价值。

【参考文献】

- [1] 张豪文. 汽车半主动悬架智能控制算法研究 [D]. 西安: 西安工业大学. 2018.
- [2] 刘晓昂, 张佳琪, 王爽. 基于模糊比例积分微分算法的汽车半主动悬架振动分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 781-785.
- [3] Tudon-Martinez J C, Varrier S. Fault tolerant strategy for semi-active suspensions with LPV accommodation[C]. Control and Fault-Tolerant Systems IEEE, 2013.
- [4] Dong X, Yu M, Guan Z. Adaptive sliding mode fault-tolerant control for semi-active suspension using magnetorheological dampers[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(15): 1653-1660.
- [5] 姚行艳. 基于自适应模糊的汽车半主动悬架容错控制 [J]. 机械设计与制造, 2021(2): 144-147.
- [6] 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.