

# 车辆动力学与控制研究进展\*

李韶华<sup>1</sup> 王伟达<sup>2,3†</sup>

(1. 石家庄铁道大学 交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043)  
(2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081) (3. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401122)

**摘要** 从车辆纵、横、垂向动力学三个方面, 结合电动汽车、智能网联等热点问题, 介绍了目前车辆动力学与控制领域的研究成果. 车辆纵向动力学方面包括车辆传动系统换挡控制、制动系统的设计与控制以及车辆状态的参数估计; 车辆横向动力学方面涉及车辆转向系统设计与横向稳定性控制; 车辆垂向动力学方面包括悬架系统的优化设计与半/主动控制. 专刊研究成果涉及车辆动力学与控制方向的多种问题, 可为今后开展相关研究提供参考.

**关键词** 车辆动力学与控制, 纵向动力学, 横向动力学, 垂向动力学

DOI: 10.6052/1672-6553-2021-042

为了进一步提升车辆的动力性、稳定性、平顺性和安全性, 车辆动力学与控制已经成为了近年来相关学者研究的重点. 作为动力学与控制学科下的一个分支, 车辆动力学与控制方向主要研究车辆在纵-横-垂三方向上的动力学响应及其控制优化问题. 专刊以车辆动力学的发展趋势以及当前研究中的关键问题作为出发点, 重点介绍了车辆驱动系统与制动系统控制, 横向稳定性控制以及悬架系统优化设计与控制三个方面的研究成果. 这些研究成果一定程度上展示了目前车辆动力学与控制领域所关注的问题及其解决方案, 希望可以为该领域的其他研究者们提供一些借鉴.

车辆是一类典型的多系统耦合复杂非线性动力学系统, 其在纵、横、垂向上表现出不同的动力学特征, 因此不同方向上的研究对象和控制目标各不相同. 车辆动力学与控制以整车及各子系统的动力学方程为基础, 通过采用合适的控制算法来实现对车速、横摆角速度、轮胎滑移率、车身侧倾角及加速度等参数的控制, 是车辆获得良好的动力性、稳定性、平顺性以及安全性的关键. 近些年来, 随着微电子技术、传感技术和自动化技术的蓬勃发展, 人们对车辆高效、节能和智能等方面的要求日益提升, 车辆行业迎来了电动化、智能化和网联化的技术变革, 也为车辆动力学与控制研究带来了新的挑战<sup>[1]</sup>.

在纵向动力学与控制方面, 随着电驱动技术发展和电子制动控制系统(EBS)等智能化系统的加入, 车辆纵向动力学与控制研究面临新的挑战, 例如: 电机(尤其是轮毂电机)带来的多动力源协同控制问题, 高级驾驶辅助系统(ADAS)对于车辆自适应巡航功能(ACC)和紧急避障功能的应用要求等. 在车辆横向动力学方面, 随着线控转向系统(SBW)和分布式驱动方案在车辆上的应用, 更多的车辆动力学参数可以得到有效控制, 车辆横向稳定性控制, 尤其是在恶劣路面和极限附着状态下的稳定性控制, 逐渐成为研究的重点. 而在垂向动力学方面, 当前的研究者在分析车辆垂向响应特性的基础上, 一方面通过优化悬架设计参数改善平顺性, 另一方面通过对半/主动悬架系统施加实时控制以实现车辆平顺性的提升. 除了纵-横-垂三向相关执行系统的控制问题, 车身姿态与自身关键参数的准确实时估计也是该领域当前关注的热点问题, 其估计效果与系统控制精度紧密相关<sup>[1-4]</sup>. 在研究上述问题的过程中, 国内的众多学者开展了大量的工作并取得了丰硕的科研成果<sup>[5-9]</sup>.

本次车辆动力学与控制专刊共征集论文 12 篇, 纵向动力学领域的驱动与制动系统控制方向 5 篇, 横向动力学领域的稳定性控制方向 4 篇, 垂向动力学领域的悬架系统优化设计与控制方向 3 篇.

2021-06-05 收到第 1 稿, 2021-06-15 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(11972238)

† 通讯作者 E-mail: wangwd0430@bit.edu.cn

## 1 车辆驱动与制动系统控制

车辆在道路上正常行驶的过程中,主要通过车辆驱动系统、制动系统实现对车辆纵向运动状态的控制<sup>[10]</sup>.针对AMT在换挡过程中存在的明显冲击和动力中断问题,燕山大学祁炳楠等对换挡过程的降扭和扭矩恢复两个阶段的动力学机理和控制方法进行了研究,从而提出了基于二阶系统特性的扭矩控制方法.除了良好的动力性,与行驶安全性相关的纵向控制技术的研究日益受到重视<sup>[11,12]</sup>.针对车辆行驶碰到突发情况时的整车避撞控制问题,重庆大学的何柳青等设计了一种提高安全距离精度的时距模型,并提出了模糊控制与PID控制相结合的分层控制器来模拟整车的紧急避撞控制.南京航空航天大学的李宇柔等对重型车辆制动过程中线控液压制动系统的动态性能进行研究,利用试验台架在缓慢制动和反复紧急制动等典型工况下进行了模型验证,保证了所提出模型的准确性.由于分布式多轴车机电复合制动系统存在迟滞效应,北京科技大学的申焱华等建立了分布式多轴车整车机电复合制动系统的动力学模型,并制定了基于规则的串联式复合制动系统的控制策略,以实现充分利用地面条件及制动能量回收最大化的效果.通过状态估计方法获取所需的精确状态参数和道路信息,已经成为车辆纵向动力学研究的重点方向<sup>[13,14]</sup>.南京航空航天大学的张华达等提出了一种汽车质量与道路坡道的串行估计算法,根据汽车质量与道路坡度变化的快慢进行分层串行估计,所提出的算法提升了计算效率,具有较高的精度与实时性.

## 2 车辆横向稳定性控制

车辆横向稳定性控制主要体现在车辆转向过程中,其功能包括两部分:首先是保证车辆在正常工况下能够辅助驾驶员实现操纵意图,其次在极限工况下能够辅助驾驶员完成紧急操纵并防止车辆失稳<sup>[15-17]</sup>.为了提高不同工况下整车行驶的稳定性,重庆大学的聂小博等提出了基于模糊PID算法的车身稳定性控制策略,以车辆质心侧偏角和横摆角速度等多种动力学参数作为评价量,有效提高了车辆在双移线、正弦和角阶跃工况下整车行驶稳定性和乘员驾乘舒适性.在不同的路面附着条件下,车辆的主要稳定性评价参数并不相同,使用单一的控制参数往往无法同时在不同附着路面获得良好

的控制效果.针对这一问题,北京理工大学的王伟达等提出了基于滑模变结构控制理论和直接横摆力矩控制的双层控制器,并通过仿真验证了所提出的基于质心侧偏角和基于横摆角速度滑模变结构控制策略在高附着和低附着路面下的控制效果.为了获得更好的转向系统性能,山东交通学院的李爱娟等研究开发了适用于智能客车转向助力系统的控制器,通过台架试验和EHPS系统试验发现,自主研制的EHPS系统实现了助力动态变化,可以满足客车转向需求.为了检测汽车转向节缺陷,山东交通学院的黄欣等提出了一种基于洛伦兹力的汽车转向节缺陷检测方法,通过采集洛伦兹力激发的超声信号进行重建图像,以检测转向节缺陷分布.结果表明,转向节中的电流密度分布、洛伦兹力分布和洛伦兹力散度分布均能体现电导率分布,进而有效检测汽车转向节缺陷.

## 3 车辆悬架系统优化设计与控制

为了改善车辆的平顺性,减少路面不平度对乘员和货物的影响,需要对车辆悬架系统进行优化设计与控制.传统悬架系统只能被动响应外部激励,自身结构参数无法实时调节,研究主要聚焦于通过优化结构参数来改善悬架系统的动力学响应.而随着主动悬架技术的发展,越来越多的学者将控制技术引入车辆主动悬架系统的设计中,以求进一步提升车辆平顺性<sup>[18]</sup>.在常规乘用车的悬架系统优化设计方面,相关学者已经进行了广泛的研究,但一些特种车辆由于受到其独有的车辆结构、行动方式和工作环境影响,呈现出独特的垂向动力学特性.因此,石家庄铁道大学的刘欢等分析了刚柔耦合特种车辆通过凸台障碍路面时的动力学特性,并以车辆质心垂向加速度为优化目标,对悬架进行优化.优化后整车和炮管的垂向加速度都明显降低,车辆平顺性得到有效改善.在悬架控制策略的制定过程中需要重构真实精确的路面不平度,才能获得更好的控制响应,石家庄铁道大学的路永婕等建立了轮胎与路面的三维动态接触关系,通过仿真验证了提出的模糊PID控制方法在两种接触条件下均优于被动悬架和天棚阻尼控制,有效改善了半主动悬架性能.轮毂电机驱动车辆簧下质量增加使得车辆垂向动力学响应发生变化,这对主动悬架系统的控制提出了新的要求.上海大学张云等为了进一步优化主动悬架系统性能,设计了基于电磁作动器的主动

悬架滑模控制系统,同时采用趋近律方法降低了滑模控制带来的抖振影响.仿真结果表明设计的主动悬架滑模控制系统能够减少车身所受影响,明显提高车辆的驾乘舒适性和平顺性.

总之,专刊的研究成果涉及了车辆动力学与控制方向的多类问题,包括车辆传动系统换挡控制、制动系统的设计与控制、车辆转向系统的设计与横向稳定性控制、车辆悬架系统的优化设计与控制、车辆参数估计等.这些研究成果都在相关理论方法的完善与实际问题的解决中起到了良好的作用.受篇幅所限,本专刊所收录的论文还不够全面,只能选取各个研究方向上具有代表性的问题进行展示.其他重要方向,如智能驾驶中的动力学控制问题、车辆主动容错控制问题、基于状态估计的自适应控制问题等研究有待进一步完善.

### 参 考 文 献

- 徐国卿,徐坤,李卫民.电动汽车动力学控制研究进展.集成技术,2012,1(1):6~14(Xu G Q, Xu K, Li W M. An overview of dynamic control for electric vehicles. *Journal of Integration Technology*, 2012, 1(1): 6~14(in Chinese))
- 李亮,王翔宇,程硕,等.汽车底盘线控与动力学域控制技术.汽车安全与节能学报,2020,11(2):143~160(Li L, Wang X Y, Cheng S, et al. Technologies of control-by-wire and dynamic domain control for automotive chassis. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2020, 11(2): 143~160(in Chinese))
- 余卓平,冯源,熊璐.分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述.机械工程学报,2013,49(8):105~114(Yu Z P, Feng Y, Xiong L. Review on vehicle dynamics control of distributed drive electric vehicle. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(8): 105~114(in Chinese))
- 郭洪艳,陈虹,赵海艳,等.汽车行驶状态参数估计研究进展与展望.控制理论与应用,2013,30(6):661~672(Guo H Y, Cheng H, Zhao H Y, et al. State and parameter estimation for running vehicle: Recent developments & perspective. *Control Theory and Applications*, 2013, 30(6): 661~672(in Chinese))
- 郭景华,李克强,罗禹贡.智能车辆运动控制研究综述.汽车安全与节能学报,2016,7(2):151~159(Guo J H, Li K Q, Luo Y G. Review of intelligent vehicle motion control. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2016, 7(2): 151~159(in Chinese))
- 李刚,宗长富.四轮独立驱动轮毂电机电动汽车研究综述.辽宁工业大学学报(自然科学版),2014,34(1):47~52(Li G, Zong C F. Review on electric with four-wheel independent drive in-wheel motors. *Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition)*, 2014, 34(1):47~52(in Chinese))
- 宋晓琳,冯广刚,杨济匡.汽车主动防撞系统的发展现状及趋势.汽车工程,2008,30(4):285~290(Song X L, Feng G G, Yang J K. The current state and trends of automotive active collision-avoidance system. *Automotive Engineering*, 2008, 30(4): 285~290(in Chinese))
- 李绍松,郭孔辉,仇韬,等.极限工况下主动前轮转向汽车稳定性控制.汽车工程,2020,42(2):191~198(Li S S, Guo K H, Qiu T, et al. Stability control of vehicle with front steering under extreme conditions. *Automotive Engineering*, 2020, 42(2): 191~198(in Chinese))
- 吴志成,陈思忠,杨林,等.越野车辆可控悬架及其控制理论的发展现状.兵工学报,2006,27(5):903~910(Wu Z C, Chen S Z, Yang L, et al. The development and present status of controllable suspension and its control theory for off-road vehicles. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(5): 903~910(in Chinese))
- 于旺.汽车纵向动力学研究综述.内燃机与配件,2020(24):23~24(Yu W. Research progress of automobile longitudinal dynamics. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2020(24): 23~24(in Chinese))
- 唐宇,戴斌,李健.大型卡车主动安全研究综述.见:第八届中国智能交通年会论文集,合肥:中国智能交通协会第八届中国智能交通年会,2013:446~453(Tang Y, Dai B, Li J. Research on active safety for heavy trucks: A survey. In: Proceedings of the 8th China Intelligent Transportation Systems Association, The 8th China Intelligent Transportation Conference, 2013: 446~453(in Chinese))
- 侯德藻.汽车纵向主动防撞系统的研究[博士学位论文].北京:清华大学,2004(Hou D Z. Study on vehicle forward collision avoidance system[Ph.D Thesis].Beijing: Tsinghua University, 2004(in Chinese))
- 林志超.多轴分布式电驱动车辆动力学建模与状态估计研究[硕士学位论文].武汉:武汉理工大学,2018(Lin Z C. Dynamics modeling and research on state estimation for multi-axle distributed drive electric vehicles [Master Thesis].Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018(in Chinese))
- 赵又群.汽车动力学中若干关键状态和参数估计研究的现状与发展.中国机械工程,2010,21(10):1250~1253(Zhao Y Q. Present state and perspectives of estimation research for several key states and parameters in vehicle dynamics. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(10): 1250~1253(in Chinese))

- 15 Rudin-Brown C M, Burns P C. The secret of electronic stability control (ESC). In: *Proceedings of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference XVII*, Montreal Quebec, 2007:3-6
- 16 Farmer C M. Effects of electronic stability control; an update. *Traffic Injury Prevention*, 2006, 7(4): 319-324
- 17 殷国栋, 金贤建. 分布式驱动电动汽车底盘稳定性控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2021 (Yin G D, Jin X J. Advanced control of chassis stability control of distributed drive electric vehicles. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2021 (in Chinese))
- 18 Li H X, Li S W, Sun W C, et al. The optimum matching control and dynamic analysis for air suspension of multi-axle vehicles with anti-roll hydraulically interconnected system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 139: 106605

## RESEARCH ADVANCE IN VEHICLE DYNAMICS AND CONTROL \*

Li Shaohua<sup>1</sup> Wang Weida<sup>2,3†</sup>

(1. *State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China*)

(2. *School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(3. *Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401122, China*)

**Abstract** The state of art of vehicle dynamics and control is surveyed in this special issue, being focused on longitudinal, lateral, and vertical dynamics, with recent hot topics like electric vehicles and intelligent network being also included. Vehicle longitudinal dynamics is devoted to vehicle transmission system shift control, brake system design & control, and vehicle state parameter estimation. Vehicle lateral dynamics focuses on vehicle steering system design and lateral stability control. Vehicle vertical dynamics deals with optimal design and semi-active/active control of suspension systems. The present special issue encompasses various different topics in vehicle dynamics and control, providing meaningful references for related future research.

**Key words** vehicle dynamics and control, longitudinal dynamics, lateral dynamics, vertical dynamics

Received 5 June 2021, revised 15 June 2021.

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11972238)

† Corresponding author E-mail: wangwd0430@bit.edu.cn