

电动汽车底盘一体化控制技术的发展趋势与展望^{*}

李以农^{*,1} 杨阳² 孙伟¹ 杨超¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要:汽车电动化、智能化的发展趋势对底盘系统提出了新的要求和挑战。电动汽车底盘控制系统正从传统的纵横二维平面控制转向整合车轮、转向甚至悬架功能的纵向、横向、垂向三维空间全方位立体综合控制。其中,基于轮毂电机技术的汽车底盘系统是实现这一目标的有效手段。本文对相关的底盘控制技术、主动悬架技术、主动轮系统进行了介绍,认为基于轮毂电机集成主动悬架的电动汽车底盘空间一体化控制技术将是今后的重要发展方向。最后,提出了这一发展过程中的关键问题,包括:轮毂电机及悬架一体化执行器的性能改进和一体化优化设计、全方位底盘系统控制策略以及执行器的测试、标准化与安全性等。

关键词:电动汽车;底盘集成控制;轮毂电机;一体化

中图分类号:TM341

文献标识码:A

doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.03.003

Status and Tendency of Integrated Chassis Control Technology for Electric Vehicle^{*}

LI Yinong^{*,1} YANG Yang² SUN Wei¹ YANG Chao¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072)

Abstract: The electric motorization and intelligentization for ground vehicle presents a new set of challenges for chassis system. The chassis control for electric vehicles is shifting from two dimensional planar controls of longitudinal and lateral dynamics to 3D spatialization integration control of longitudinal, lateral and vertical dynamic. And the in-wheel motor based chassis system is a promising solution for the requirement. In this paper, an exhaustive introduction of this evolution, as well as the relevant chassis control, active suspension and active wheel technology are exhibited. It can be figured that the novel chassis system of in-wheel motor incorporates with active suspension will be an important development tendency. Finally, the requirements and demands for the novel electric vehicle chassis 3D spatial control are investigated and proposed, and the key issues would be the actuator design and optimization, global control strategy, as well as the testing, standardization and safety for the actuator.

Key words: electric vehicle; vehicle chassis integration control; in-wheel motor; integration

1 引言

随着汽车产量和保有量的迅速增长,人类面临严峻的能源、环境和气候的巨大挑战,以电动汽车为代表的新能源汽车是实现交通可持续发展的最佳选择,发展电动汽车,实现汽车能源动力系统的电气化,推动传统汽车产业的战略转型,在国际上已经形成了广泛共识。随着汽车电动化的发展趋势,汽车系统正在发生质的改变,从传统的运动的机械系统进化为带有轮子的计算机系统,这不仅对汽车底盘系统提出了新的发展要求,也是汽车底盘控制系统新的发展机遇。随着汽车底盘系统复杂程度的日益

提高,传统汽车底盘技术单系统的控制已经无法兼顾汽车电动化、智能化整体性能的提高,因此迫切需要寻求新的方法来进一步改善整车综合性能,汽车底盘动力学控制也就成为汽车研究领域的热点问题之一。

发展汽车底盘系统的最初目的是实现车辆的制动、驱动,即车辆纵向动力学的控制。随着汽车系统的完善,各种底盘电子控制技术也得到了巨大的发展和广泛的应用,例如防抱死制动系统(ABS)、牵引力分配系统(TCS)、四轮转向系统(4WS)以及电子稳定程序(ESP)等,它们的研究和应用对汽车性能的提高有重大意义。这些系统将汽车操纵稳定性,即汽车横向动力学的控制纳入底盘控制系统中。但由于汽车底盘是由悬架、制动、转向等多个子系统相互联结而成的复杂动力学系统,各子系统间存在强

2015-09-28 收稿,2016-01-20 接受,2016-06-25 网络发表

^{*} 国家自然科学基金(51275541)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: ynli@cqu.edu.cn

烈的耦合效应,传统的纵横二维平面控制已经不能满足汽车电动化、智能化的发展趋势。

随着电动汽车技术、电机驱动技术及智能化汽车控制理论的发展,作为汽车动力学的另一个主要分支——汽车垂向动力学控制也逐渐集成到汽车底盘控制中,整合车轮、悬架功能的纵向、横向、垂向三维空间全方位立体综合控制将是汽车底盘控制必然的发展方向。电动汽车通常采用集中驱动式与轮边驱动式两种方式,轮边驱动结构比传统内燃机和集中电机驱动更易于实现复杂的运动和动力学控制,被看作是电动汽车的最终驱动形式,已成为国内外电动汽车技术研究的重点之一。

2 电动汽车底盘新技术的发展

2.1 汽车电动化与智能化发展趋势及要求

随着全球汽车技术的进步和各国汽车产业战略的不断演化,当前汽车领域有两大必然的发展趋势,即汽车系统的电动化与智能化。汽车动力学智能化控制的前提是需要可靠性高、结构与控制简洁且易于实现的汽车动力学底盘系统。这就对集成度更高、更专注于汽车动力学功能实现和控制的新型底盘系统提出了需求。这样的系统不仅需要降低控制难度,还需要避免功能耦合与矛盾、系统的冗余性。另一方面,相比智能化,汽车的电动化作为一个曾经古老而现在却重新焕发活力的问题,更是当前汽车领域研究的热点。随着人类面临越来越严峻的能源、环境和气候问题挑战,以电动汽车为代表的新能源汽车是实现交通可持续发展的最佳选择。

根据动力驱动形式的不同,电动汽车主要分为两类,即采用电机代替内燃机并配有传动系统的集中驱动式电动汽车,以及采用轮毂电机技术直接驱动车轮的轮边驱动式电动汽车。其中,轮边驱动式电动汽车动力系统布置灵活,省略了传统汽车的机械传动系统,使得整车质量降低,结构简洁紧凑、可利用空间增大、传动链缩短、传动效率提高。同时,

由于轮毂电机转矩响应比内燃机快速而精确,可以通过线控技术(X-by-wire)直接实现各轮驱动力和制动力的独立控制,集成 ABS、ESP、TCS、DYC、EBD 等底盘稳定性系统,降低了对额外附件的依赖和单车成本。因此,轮边驱动结构比传统内燃机和集中电机驱动更易于实现复杂的运动和动力学控制,已被视为电动汽车的最终驱动形式,是国内外电动汽车技术研究的重点和热点之一,并成为电动汽车发展的一个方向。

2.2 轮毂电机技术及其底盘系统系统的集成化

随着汽车电动化与智能化的趋势演化,轮毂电机底盘电动汽车的发展经历了两次集成化阶段。

2.2.1 电动汽车底盘系统的第一次集成化

轮边驱动结构的产生和发展与现代汽车技术密切相关,其概念及相关专利可以追溯到十九世纪末,早在 1896 年就出现过柴油机式的轮毂驱动技术。随后保时捷公司于 1901 年推出的 Lohner Porsche 电动汽车就采用了轮毂电机式的轮边驱动结构^[1],该车的轮边驱动系统选用永磁直流无刷电动机,额定功率为 6.8 kW,峰值功率为 20 kW。随着当代电动汽车的逐步发展,轮边驱动技术再一次受到了人们的重视。如新兴科技公司 Protean Electric 专门为各大汽车公司电动化产品提供集成化轮毂电机驱动系统,如图 1 所示。

轮毂电机是轮边驱动电动汽车的关键核心技术^[2,3],一直以来都是国内外研究的热点,许多研究机构都对其进行了深入研究,这些研究的重点多放在轮毂电机的动力性控制与轮边驱动结构的底盘系统控制等方面。日本的庆应义塾大学以及普利斯通公司、三菱、丰田、本田汽车公司在过去的十几年中,分别开发了以轮毂电机驱动的六种不同形式的电动汽车样车^[4];美国通用汽车 2005 年开发的氢燃料电池电动汽车 Sequel 集轮边驱动技术和线控转向技术为一身,是向燃料电池电动汽车产业化进程迈出的重要一步。在欧洲,法国 TM4 公司设计了具有制



图1 Protean Electric 出品的轮毂电机系统

动鼓特性的一体化电动轮驱动系统;英国贝姆勒公司也研制出了四个车轮均采用永磁无刷电机驱动的轮边驱动电动车 Miniqed^[5]。

我国的轮边驱动技术在国家“863”计划电动汽车重大课题研究推进下也取得了一定的进展。同济大学分别在 2002 年和 2003 年研制出了采用 4 个低速永磁无刷直流轮毂电机直接驱动的四轮独立驱动燃料电池微型电动汽车动力平台“春晖一号”和“春晖二号”,随后在 2004 年又推出了“春晖三号”线控转向四轮驱动燃料电池汽车^[6];此外,北京三环通用电气公司也开发了 7.5kW 的电动汽车轮毂电机,哈工大-爱英斯电动汽车研究所在其开发的 EV96-I 型电动汽车中采用了双边混合式磁路结构的多态轮毂电机驱动系统^[5];吉林大学和天津一汽联合开发的串联混合动力电动汽车,前轮采用混合驱动系统,后轮由两台轮毂电机组成独立驱动系统^[7]。

针对轮边驱动技术的研究,其重点之一就是如何采用新式动力形式实现传统汽车的底盘控制系统,如防抱死制动、差速问题甚至 DYC^[8]、ESP 等主动底盘安全系统。在轮边驱动动力学控制的研究方面,Jain M^[9]分别以两轮驱动、四轮驱动电动汽车为研究对象,对感应电机、永磁同步电机、永磁无刷直流电机及开关磁阻电机进行了对比分析,认为盘式永磁电机是轮边驱动的最优实现形式,并根据阿卡曼转向几何原理对轮毂电机进行电子差速控制,设计了融合 ABS、ESP 等功能的控制策略。Houyu Y^[10]采用线性前馈控制和增量 PID 反馈控制的混合控制方法,对轮毂电机的调速控制进行了研究和测试,使轮边驱动电动汽车获得了平滑的启动特性和较好的低速变速能力。国内的靳立强、宋传学等^[11]也对轮边驱动电动汽车的助力转向和差速控制等问题进行了相关研究,改善了电动汽车的操纵特性。

电动汽车的稳定性、安全性问题也得到越来越多的关注^[12,13]。文献[14]设计了能承受轮胎横向载荷的轮毂电机,Canibano E^[15]开发了用于轮边驱

动电动汽车的横摆力矩控制系统,余卓平等^[16]提出了为轮边驱动电动汽车进行车身质量估计、路面状况辨识的自适应 RLS 算法,这些研究为提高轮边驱动电动汽车的操纵稳定性提供了基础。

上述轮边驱动底盘控制技术的发展,促进了轮毂电机技术的集成化发展。轮毂电机的设计不再局限于驱动/制动,更多的功能被集成到轮边驱动结构中,其中的典型代表如 Volvo ACM (Autonomous Corner Module) 系统^[17-19],该系统集成轮毂电机、双转向执行机构、摩擦制动器、主动悬架系统和减震器。根据不同的车辆轴荷和应用场合,通过对执行器参数的调整,ACM 可以支持不同类型全线控智能车辆,如图 2 所示,使汽车的纵向控制与横向控制集成化。这可以称为轮边驱动电动汽车底盘系统第一阶段的集成化。

2.2.2 电动汽车底盘系统的第二次集成化

1) 轮毂电机对电动汽车的垂向耦合效应

除轮边驱动电动汽车实现传统汽车的底盘控制问题外,特殊的动力布置形式及结构配置也导致了电动汽车在汽车动力学上的其他问题,其中较特殊的问题就是轮边驱动电动汽车的平顺性和操纵稳定性矛盾激化,影响了车辆舒适性和安全性,具体体现在以下两个方面:

首先在平顺性问题上,由于电机的特殊力矩波动不经减振器直接作用在车轮上,其周向力矩波动在特定大扭矩转速区间,不仅容易引起传统悬架系统前后方向的非垂向共振,影响整车舒适性,而且使电机的工作环境恶化、疲劳寿命降低。

其次,除新结构导致的振动平顺性问题外,更需要特别关注与安全性有关的操纵稳定性等问题。由于引入轮毂电机,整车的非簧载质量(一般增加 15 kg 左右)及车轮转动惯量显著增加,不但影响了车辆的加速性能,而且会与电机激励共同导致轮胎动载荷增大,抓地能力下降,汽车侧滑或侧翻风险增大,降低了行驶安全性。

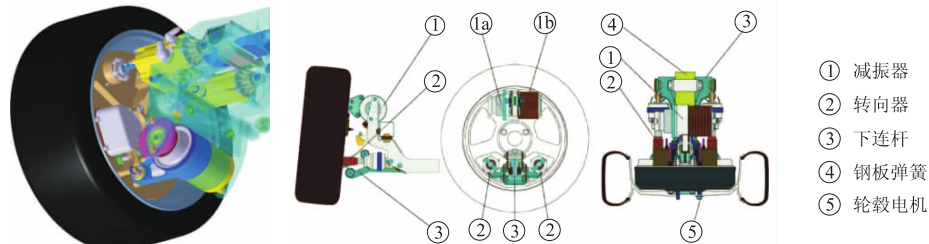


图2 Volvo ACM 系统结构及示意图

针对轮边驱动电动汽车的振动问题,国内外的
大量研究结果表明电机的特殊扭矩波动是影响汽车
平顺性的主要因素。Prabhu S^[20]对开关磁阻电机
进行了振动分析,认为电机振动的主要来源是电磁
力对定子的作用,其振动强度受定子形状及电机转
动周期的影响,其振动幅值在较小时可以简化为模
态的线性叠加。韩国的 Yunhyun C 等^[21]对电机瞬
态磁场、静态结构及振动模态的有限元分析表明开
关磁阻电机的振动噪声情况与其磁体布置有直接关
系,单个相位中磁极越少,电机的振动越剧烈。此
外,文献[22]针对定子和转子间磁场间隙导致电磁
力分布不均的问题,通过结合修正的 Taguchi meth-
od 算法和响应面法优化了永磁同步电机结构,降低
了其齿形力矩波动。国内学者也对轮边驱动电动汽
车的振动问题进行了研究。于增亮等^[23]通过对四
轮轮毂电机驱动电动汽车车内噪声及传递路径的
分析研究,认为轮毂电机转矩脉动直接引起车轮的
周向力矩波动,是引起动力总成振动的主要原因。
同济大学的宁国宝^[24-27]研究了被动悬架结构非线
性对轮毂电机驱动电动汽车的影响,指出由于轮毂
电机的引入,整车的非簧载质量显著增加,不仅影
响汽车平顺性,而且降低了行驶安全性;此外,由于
电机力矩波动直接作用于车轮,在特定大扭矩转速
区间,容易引起悬架前后方向的共振;在如何减少
非簧载质量方面,还介绍了一种动态吸振形式轮边
驱动系统,通过在车轮转向节上加装动力吸振器,将

电机质量转换为吸振器质量,不仅可以直接降低非
簧载质量,而且还可以利用分离出来的电机质量进
行吸振。Bridgestone 就是以相关的原理设计了一
种轮毂电机轮边减振器^[28],如图 3 所示。但这种
系统需要特殊形式的电机和弹性阻尼元件,同时由
于电机转子和车轮一起转动,直接增大了轮胎动
载荷。此外,上海交通大学的张建武等^[29]还设计
了一种轮边驱动电动汽车的动力减振机构,其主要
思想是将定子做成中空,通过减振装置分别与轮
轴和车身相连,此时轮毂电机的定子及其减振装
置构成新的动力减振机构,并与电动汽车原有的
悬架系统并联,相当于将轮毂电机的定子质量由
非簧载质量转移至簧载质量,通过系统参数优化,
提高了汽车的平顺性并降低了轮胎动载荷。吉林
大学的靳立强等^[30]通过引入万向节,将轮边驱
动中的电机由非簧载质量变为簧载质量,降低轮
边驱动形式对汽车质量分布的影响。
而针对轮毂电机造成的电动汽车平顺性和操纵
稳定性问题,国内外学者进行了大量的研究。An-
derson M^[31]认为轮边驱动结构布置形式对汽车主
动安全造成的影响比其对平顺性的影响更需要关
注。Rojas A^[32]针对轮边驱动系统非簧载质量增
加使舒适性和安全性恶化的问题,研究了在不同
电机驱动扭矩下,被动悬架和主动悬架解决该问
题的措施,探索了轮边驱动电动汽车动力性与安
全性、舒适性之间的关系。此外,Massimo C^[33]以
双轮毂电机驱动的四轮转向汽车为对象,针对转
向稳定性及无刷永

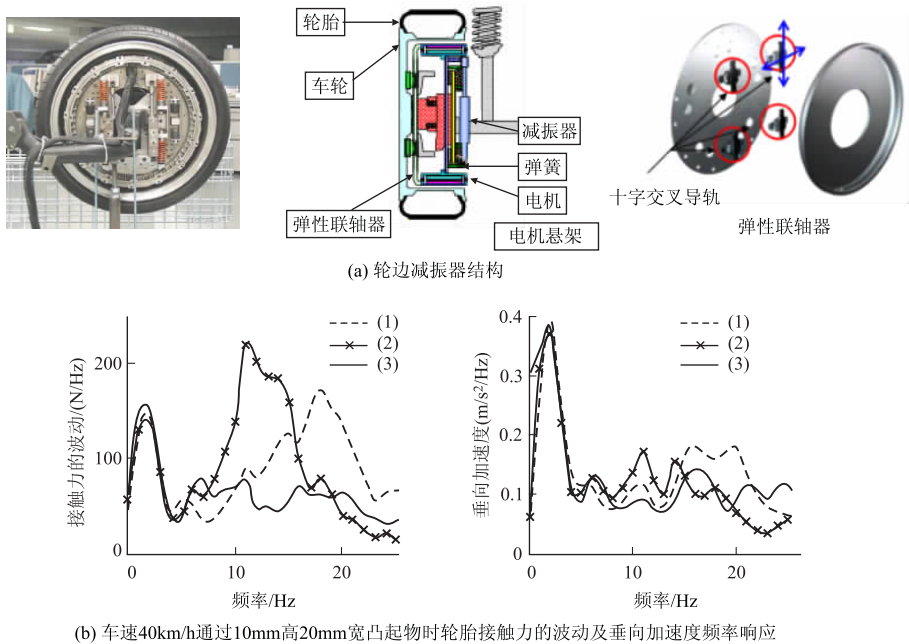


图3 Bridgestone 设计的轮毂电机轮边减振器及性能分析

磁电机的跳动问题,进行了悬架匹配设计和电机应力强度方面的研究。余卓平等^[34]介绍了一种前轮发动机驱动、后轮轮毂电机驱动的新型混合动力汽车,借助后轮轮毂电机的美好力矩控制能力和快速响应能力,采用 H^{*} 控制器对后轮力矩进行控制,抵消了汽车在启动、变速等工况下,由发动机及离合器等传动部件所造成的纵向冲击,改善了汽车的纵向平顺特性。

可见,轮边驱动电动汽车的悬架匹配设计不仅局限于车辆垂向动力学问题,更需要特别考虑操纵稳定性等安全问题。针对轮边驱动电动汽车平顺性、操纵稳定性普遍较差的缺陷,目前的解决方案主要是通过设计动力吸振机构^[27],将电机定子质量由非簧载转化为簧载,并采用新材料、新结构降低非簧载质量以提高操纵稳定性,同时通过改善电动力矩控制算法、对悬架进行参数匹配和优化以提高平顺性。但以上措施仍是传统方法的延续,降低了轮边驱动可靠性并增加了其结构复杂程度,且对平顺性和操纵稳定性予以分开考虑,若要从根本上解决两者的矛盾问题,必须借助主动悬架的优势,开发适合轮边驱动电动汽车的主动悬架控制策略^[26]。

2) 基于主动悬架的解决方案

在电机驱动、智能控制等新技术的冲击下,汽车底盘更加智能化,对悬架系统提出了更高的要求,使传统悬架系统受到挑战。更小巧、更稳定、控制能力更强且能够缓解操纵稳定性与平顺性控制之间矛盾的新型主动悬架无疑是未来悬架系统发展的趋势。

主动悬架系统通过控制调节悬架的刚度和阻尼力,突破传统被动悬架的局限,使汽车的悬架特性与道路状况和行驶状态相适应,从而能满足汽车平顺性和操纵稳定性的要求。但主动悬架系统严重的能量消耗问题限制了其发展。近年来,响应迅速、控制精确且能量消耗低的电磁主动悬架^[35,36]及其相关研究逐渐兴起,其关键执行器为旋转电动机或直线电机^[37,38]。Mats J^[39]设计了一种采用旋转电机作为执行器的电磁主动悬架,并通过基因算法优化了其关键参数,通过理论分析和实验测试验证了电磁主动悬架的可行性。而国内学者喻凡^[40]、张继业等^[41]采用传动机构(如滚珠丝杆螺母、齿轮齿条)配合旋转电机将旋转运动转化为直线运动,使主动悬架具有较高的功率因数和起动力。

这些研究使主动悬架高能耗、高成本、低作动力的不足不断得到改善。近来美国 BOSE 公司推出一

款电磁主动悬架系统,如图 4 所示,将磁悬浮技术应用于汽车悬架,采用直线电机作为主动悬架的执行元件,取代以往主动悬架中的液压或气动执行器,并通过并联功率放大器改善了直线电机作动力小的缺点,使其具有较宽的作动频率,显著提高了主动悬架的执行速度和控制效果^[42,43]。



图 4 Bose 开发的直线电机电磁主动悬架系统

梅赛德斯-奔驰采用类似的主动悬架系统,结合主动车身姿态控制(Active Body Control, ABC)和全局路面扫描功能结合(globally innovative road surface scan function),借鉴仿生学“鸡头防抖”实现了魔术车身控制(Magic Body Control),有效地改善了车辆平顺性和操纵稳定性在不同车速和路况下的综合要求。

电磁主动悬架高效的表现使其与被动悬架、半主动悬架以及液气压主动悬架相比更具有优势。在这方面的研究,可以主要总结为以下几个方向:

文献[44,46]针对用于主动悬架的感应式电磁直线电机进行了研究,不仅对其进行了结构设计,还对其磁场分布、磁场力输出情况进行了仿真计算和实验测试,尽管感应式电机具有结构简单、控制方便、成本低、适于大功率工况的优点,但能量回馈系统复杂。

与交流电动机相比,文献[47,48]等采用的直流电机具有运行效率高、没有功率因数低的问题、控制比较方便灵活等优点,其速度和加速度控制范围广,调速的平滑性好,但由于需要带绕组的电枢和引流用的电刷,难实现无刷无接触运行。另外,Amati N^[49]针对直流无刷直线电机式的电磁主动悬架,介绍了其机电参数的集成设计和优化流程,通过控制其阻性负载实现电磁阻尼力的调节。此外,香港理工大学的 K. W. E. Cheng 等^[37,50]创新性地采用了新

型开关磁阻直线电机作为悬架执行器,不仅降低了对永磁体等高成本材料的需求,而且相比感应电机具有结构简单、易于能量回馈的优点,如图 5 所示。

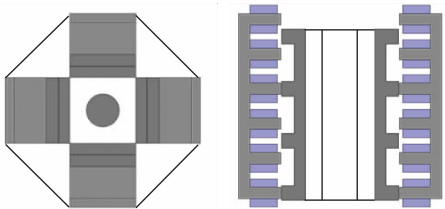


图 5 香港理工大学的直线式开关磁阻电机方案

而目前研究较多的电磁悬架主要是采用永磁式同步电机,其力能指标高、体积小、重量轻,且具有发电制动功能,缺点是造价高、控制复杂,需要位置检测,有失步危险,同步时电流需要切换。在这方面研究较多的有荷兰埃因霍温科技大学的 Paulides J 等^[43,51-53]、德州农机大学的 Won-jong Kim 等^[54-56]、纽约大学石溪分校的 Lei Zuo 等^[42,57,58]以及英国谢菲尔德大学的 Jiabin Wang 等^[35,38,59]。其中,荷兰的 Paulides J 等在这方面的研究较深入,针对这种电磁主动悬架系统设计了线性二次型调节控制器,分别以每轮 47 W 和 37 W 的功率消耗降低了 36% 的簧上质量加速度响应和轮胎动载荷。这种电磁主动悬架的作动力密度可达 663 kN/m³,并且具有良好的能量回收能力,能以 150 ~ 300 W 的较低能量消耗,显著改善汽车平顺性和操纵性,如图 6 所示。

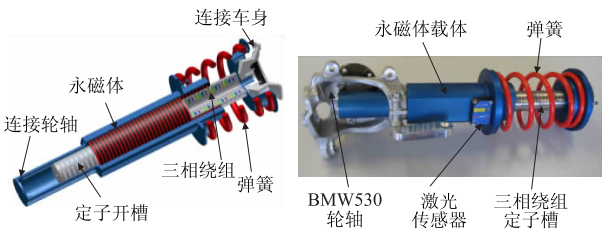


图 6 荷兰埃因霍温科技大学的永磁同步直线电机主动悬架方案

3) 集成化的底盘驱动系统

随着轮边驱动结构的发展及轮毂电机、新式主动悬架技术的兴起,更多的功能被集成到轮边驱动结构中。针对轮边驱动电动汽车的底盘和悬架问题,Clippard R 等^[60,61]分析了一种二自由度的双电机轮边驱动结构(dual electric drive and suspension, DEDS),如图 7 所示,当同一方向上驱动力相同时,电机输出直接用于驱动;而当驱动力不同时,这种双电机结构会产生垂直力分量,使悬架伸展或压缩,实现驱动力的分配和悬架的主动控制,从而降低了轮边驱动结构过大使非簧载质量增大而带来的影响。该研究结果显示,虽然这种结构本身在两个自由度

上是耦合的,但对两个方向的控制可以实现解耦,在对悬架进行振动主动控制的同时能保证驱动轮恒定的驱动力矩和转动速度。类似的,还有具有旋转、直线运动双功能输出的电机系统,既可以作为轮毂电机驱动器,也可以作为主动悬架执行器^[62]。这种汽车底盘动力学控制三维空间化的思想也受到了学者的重视^[63-65]。

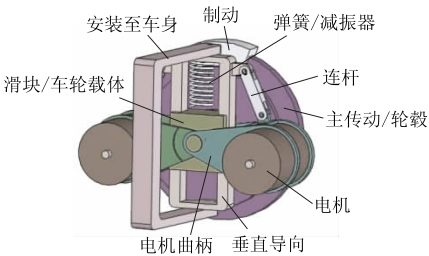


图 7 克莱姆森大学的主动轮原理方案

借鉴这种思想,法国米其林公司提出了将制动、转向及差速转向、甚至悬架功能集成到轮毂电机中的思想^[66],即“主动轮”技术(Active Wheel),如图 8 所示。它是指集成了驱动电机和悬架系统的电动车轮系统。这种技术用车轮内置的主动悬架代替车桥上的传统机械悬架,在车轮系统中集成了驱动力矩/制动力矩分配、牵引力控制、转向控制、车身姿态控制、横摆力矩控制以及悬架阻尼等多种底盘控制功能,不仅克服了传统汽车悬架、驱动系统存在的布置复杂、耦合振动等缺点,更可以有效解决轮边驱动引起的电动汽车舒适性、安全性等方面的新问题。借助这种新式主动轮系统,有利于改善汽车平顺性和操纵稳定性之间的矛盾。不同于 ABS、ESP、TCS、DYC、EBD 等汽车稳定性控制是通过控制车轮驱动力/制动力提高车辆操纵稳定性,主动轮系统是通过主动悬架和轮毂电机集成,控制车轮与车身相对位置、车身姿态及车辆在行驶坐标系中的惯量分布来提高操纵稳定性,在保证良好乘坐舒适性的同时,进一步改善车轮接地性、减小车身侧倾,并大大降低驱动力/制动力的控制强度和复杂程度,提高稳定性控制的有效性和可靠性。类似的还有 Siemens VDO

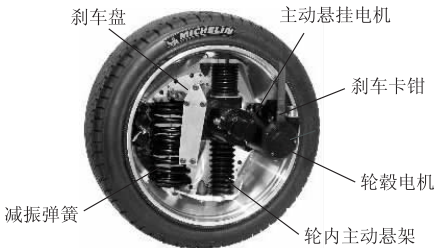


图 8 米其林主动轮系统

eCorner System 系统^[67],如图 9 所示。

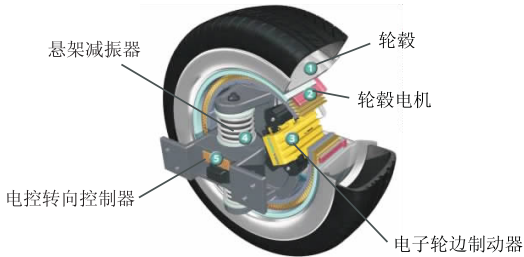


图 9 Siemens VDO eCorner 系统

以上轮毂电机及主动悬架的集成化,可以认为是轮边驱动电动汽车底盘系统的第二阶段集成化发展。其主要思想是将汽车底盘动力学系统与车身其他系统分离,而将汽车动力学纵向、横向、垂向控制系统功能集成。这样的底盘功能化发展趋势,不仅提高了控制系统的可靠性和有效性,而且易于避免底盘功能耦合与控制目标的矛盾性。

3 底盘一体化集成控制发展的现状和需求分析

综上所述,汽车的电动化与智能化是汽车的必然发展趋势,两者的结合也是必然的发展目标。如新能源汽车的领军企业特斯拉公司声明,将与谷歌合作研究自动驾驶电动汽车,引起业内轰动。但汽车电动化与智能化也对底盘系统提出了新的要求,研发新一代电动汽车的智能化动力与底盘控制系统,需要可靠性高、结构与控制简洁且易于实现的汽车动力学底盘系统。这就需要集成度更高、更专注于汽车动力学功能实现和控制的新型底盘系统。这样的系统不仅需要降低控制难度,还需要避免功能耦合。

汽车底盘动力学控制是国际汽车研究领域的热点问题之一。随着汽车智能化、电动化发展趋势的日益显著,传统的汽车底盘系统复杂程度越来越高,单目标的控制无法兼顾整体性能的提高,已经不能长期适应汽车的发展要求,因此迫切需要针对电动汽车研究新式底盘系统,以满足电动汽车在底盘控制、操纵稳定性、平顺性等多方面的综合要求。因此,轮边驱动结构与新型底盘动力学控制是实现汽车电动化与智能化的有效手段之一。

然而,由于特殊的动力布置形式及结构配置,电机的特殊力矩波动直接作用于悬架及驱动系统,以及轮毂电机附加的非簧载质量,导致轮边驱动电动汽车的振动问题激化了汽车的平顺性和操纵稳定性

矛盾,限制了轮毂电机驱动电动汽车的广泛应用。对轮边驱动电动汽车而言,不仅需要考虑振动对平顺性的影响,更需要考虑轮胎动载荷变化造成的操纵性、行驶安全性等问题。针对以上问题,研究以轮毂电机为基础,集成主动悬架、底盘控制等多系统协调工作的新式主动轮底盘系统,不仅为改善轮边驱动电动汽车平顺性和操纵稳定性矛盾恶化的新问题提供了途径,而且适应了汽车系统电动化及智能化的发展趋势。

基于驱动/制动、转向及主动悬架一体化思想的主动轮系统,可以让研究人员不再拘泥于底盘控制系统的机械结构及硬件功能实现上,而可以专注于汽车动力学控制问题的根本,即车轮驱动/制动力的分布,以及主动轮系统的悬架力/位移控制问题。另外,对悬架系统、制动系统和转向系统进行一体化集成及联合控制,还可以在系统间实现信息共享,充分利用有限的传感器、控制器资源,以降低车辆成本,从根本上解决不同控制目标间的相互干扰,实现汽车底盘控制系统“高功能内聚、低系统耦合”的特性,为汽车底盘智能化控制提供基础。

综上所述,随着电动汽车动力性及续航能力的不断提高,人们对电动汽车的安全性和舒适性要求将越来越高。因此,推动电动汽车的平顺性和操纵稳定性研究,将是今后电动汽车,特别是轮边驱动式电动汽车的研究热点。针对轮毂电机导致电动汽车平顺性、操纵稳定性方面的新问题,将制动/驱动、转向主动悬架功能集成到轮毂电机中的思想促使了“主动轮”概念的产生,并为解决轮边驱动电动汽车的平顺性与操纵稳定性矛盾加剧的问题提供了机遇。采用轮毂电机集成直线电机主动悬架的新技术,研究新一代电动汽车底盘动力学一体化控制系统,通过车身姿态控制和电磁主动悬架控制的有效结合,将底盘控制重心由车轮的纵横二维平面转向集成车轮、悬架的纵向、横向、垂向三维空间全方位立体综合控制,使垂向动力学控制目标兼顾平顺性和操纵稳定性的综合控制,发挥轮边驱动结构的独特优势,实现其“高功能内聚、低系统耦合”的特性,将汽车动力学的控制目标空间立体化、控制手段一体化,不仅对汽车底盘综合控制系统的设计与开发及汽车技术的进一步发展具有重要的理论意义和工程价值,还能够满足人们对汽车电动化、智能化发展的需求。

为满足以上要求,还需要解决以下关键问题:

1) 关键执行器的性能改进和一体化优化设计

主动轮技术的实施基础是轮毂电机与电磁主动悬架执行器的集成设计。一方面,应以降低结构复杂性和系统耦合程度为目标,实现主动轮系统中轮毂电机和直线电机式电磁主动悬架的结构集成设计。另一方面,针对电磁悬架普遍存在的功率密度低的缺点,需要对执行器进行结构优化,以改善直线电机的功率因数、起动推力等特性;此外,还需要对电磁主动悬架执行器的空间布置进行拓扑优化,实现传统悬架由单一垂向动力学向纵、横、垂向三维耦合控制拓展,以解决轮边驱动结构特殊动力布置形式造成的悬架非垂向共振等问题。

2) 底盘底层控制系统的重构与全方位底盘控制

轮边驱动电动汽车的平顺性、操稳性和主动悬架能量消耗等三个问题相互制约耦合,需要建立统一的多目标空间域,对主动轮系统的纵向、横向、垂向各功能权重进行有效辨识,以更直观的方式表达各目标的相容区域叠加效应和干涉区域的协调机制,以及各功能在空间域中的特性场分布、性能谱图和可控区域,明晰功能实现过程中参数的耦合度和相互影响关系,为系统级控制策略与子任务分配的研究提供依据。

底盘底层控制系统的重构是指对汽车底盘系统整体化控制目标和过程的统筹规划,从车辆动力学系统多目标一体化控制的角度出发,以轮胎与地面的作用力耦合机理、车身姿态控制为解决问题的关键,需要对涉及汽车纵、横、垂向运动的驱动/制动、转向及悬架等底盘功能进行综合控制研究。控制目标不再独立、甚至相互矛盾,而是以车身六自由度、车轮六自由度耦合动力学的姿态控制为主要目标,实现车身、轮胎横纵垂、侧倾、俯仰、横摆的姿态稳定和振动最小化。底盘控制系统的控制过程也从传统的扭矩(动力性及稳定性)、车身加速度响应(舒适性)转向轮胎工况、车身姿态的综合控制,通过主动悬架与驱动电机的联合控制实现对平顺性的高频控制、对操纵稳定性的低频准静态控制的隔离,解决汽车动力学响应的矛盾问题,从而实现主动轮电动汽车底盘系统“高功能内聚、低系统耦合”的优点,将底盘控制由传统的、不关联的单维度控制,转向集成车轮、悬架的三维空间化、全方位立体化综合控制。通过这种具有底盘控制立体空间化特性的主动轮系统来实现全方位底盘控制(global chassis control,

GCC)^[68],是目前较具有可行性的方案。

3) 整车多自由度姿态控制

整车姿态不仅包括对平顺性影响较大的车身姿态,也包括对操纵稳定性影响较大的车轮运动姿态。为改善轮边驱动电动汽车平顺性和操稳性的矛盾,主动悬架执行器理论上最优的工作状态为刚柔耦合的单向作动,即对车身体现为柔性作用不施加主动动力,避免车身加速度响应过激,保证车身平稳;而对车轮体现为刚性作用实现力和位移控制,避免因动载荷过大造成轮胎跳动等问题。如何在新型电磁主动悬架上实现这一目标,配合轮毂电机驱动、转向控制车轮运动姿态,保证执行器对车轮的单向力与位移耦合控制、位移与加速度复合控制、车身姿态控制,是改善轮边驱动电动汽车平顺性和操稳性矛盾的关键。

4) 执行器的接口标准化与汽车开放性系统构架

而基于线控技术的主动轮电动汽车底盘系统,集成了驱动/制动、转向及主动悬架,可以让研究人员不再拘泥于底盘控制系统的机械结构及硬件功能实现上,而可以专注于汽车动力学控制问题的根本,即车轮驱动/制动力的分布,以及主动轮系统的悬架力/位移控制问题,不必过多考虑执行器实现、系统协同工作等问题。但这就要求各执行器具有标准的输入输出控制特性,实现系列化、标准化、接口化,能根据工程人员的需要对硬件系统进行扩充和维护。

要实现上述目标,必须制定统一的标准体系和系统接口。目前,欧洲的汽车行业最先发起并正在研究和探讨建立汽车开放性系统构架(automotive open systems architecture, AUToSAR)^[68],目前全球范围内有宝马、奔驰、大众、欧宝、标致、丰田、福特、博世、大陆和西门子等 50 多个汽车生产家和汽车配件生产厂家参与这项工程。国内一汽、长安等整车厂技术研究院也于 2009 年逐渐开始将 AUToSAR 标准用于 ECU 的设计、开发、验证等方面。在汽车底盘控制研究中,以 AUToSAR 规范为基础进行控制系统等软件体系的开发,能够高效管理愈来愈复杂的车辆电子系统和执行器,有利于实现上述汽车动力学本质问题的改善。

5) 新式底盘系统的测试技术和方法

基于主动轮的新型汽车底盘系统中,汽车动力学的多项功能集成在驱动车轮中,如驱动、制动、转向、悬架系统,单个车轮或四分之一汽车模型将包含

更多的信息,这样汽车底盘总成的测试环境将大大简化。但在实际应用中,需针对这种“高性能内聚、低系统耦合”的动力系统进行测试方法和技术的匹配,充分针对不同工况下系统的动态、静态性能,测试主动轮在模拟路面下簧载质量、非簧载质量的位移、加速度响应,验证控制器对车身姿态控制、车身位移及加速度响应、轮胎位移及动载荷复合主动控制的效果。此外通过施加轮毂电机控制信号,测试主动轮的驱动、制动等性能,并将单个车轮的测试结果向整车扩展,为多个主动轮系统的协调控制提供基础。由于特殊的结构及布置形式,传统汽车动力学测试台架需要进行改装以匹配这种新型底盘系统,现有的测试方法也需要有针对性地进行完善。

6) 电动汽车与线控技术安全性

最近据有关媒体报道,一辆特斯拉汽车电动汽车在行驶过程中发生碰撞事故,随后该车的警报系统显示车辆故障并起火。尽管特斯拉电动车起火事故概率是传统汽油车的五分之一,但作为新兴事物,人们对其安全性的要求往往更高。而以线控技术为基础的主动轮电动汽车底盘系统,由于省略了很多机械传动装置,没有机械冗余,当控制线束、电子控制器受到干扰或失效时,其安全问题反而更为突出。

随着汽车电子化、集成化的发展需要,线控技术发展迅速,也是主动轮电动汽车底盘系统实现底盘控制空间立体化的基础。但目前电子化还不可能完全取代机械化^[69]。从具有机械支持的线控系统到无机械支持或无机械支持的安全线控系统是很长的一个发展过程。因为与机械部件相比,线控系统电子和电气部件的可靠性更低,且失效形式各不相同。因此,集成系统必须具有容错能力,以某种方式补偿失效,以避免整个系统的失效。采用冗余元件虽然是一种简单有效的方式,但会使整个系统更加复杂、成本更高。目前最有可能的是采用分布式容错的机电系统代替传统的机械或液力支持系统^[70]。

4 结束语

针对轮边驱动电动汽车平顺性、操纵稳定性普遍较差的缺陷,目前的解决方案主要是通过设计动力吸振机构,将电机定子质量由非簧载转化为簧载质量,并采用新材料、新结构降低非簧载质量以提高操纵稳定性,同时通过改善电机力矩控制算法、对悬架进行参数匹配和优化以提高平顺性。以上措施仍是传统方法的延续,降低了轮边驱动可靠性并增加

了其结构复杂程度,且对平顺性和操纵稳定性予以分开考虑,若要从根本上解决两者的矛盾问题,必须借助主动悬架的优势,开发适合轮边驱动电动汽车的主动悬架控制策略。主动轮技术的思想为有效改善汽车平顺性和操纵稳定性之间的矛盾提供了新的途径。用车轮内置的主动悬架代替车桥上的传统机械悬架,在车轮系统中集成驱动力矩/制动力矩分配、牵引力控制、转向控制、车身姿态控制、横摆力矩控制以及悬架阻尼等多种底盘控制功能,不仅能克服传统汽车悬架、驱动系统存在的布置复杂、耦合振动等缺点,还可有效解决轮边驱动引起的电动汽车舒适性、安全性等方面的新问题。

随着汽车电动化与智能化的发展要求,汽车底盘系统的革新也日趋必要。汽车底盘的控制目标将由传统的、单一独立甚至相互矛盾的控制目标,转变为统筹规划后的以整车运行姿态为目标的综合控制。这一发展趋势的突出特点是底盘控制三维空间化、全方位立体化,也即包括驱动系统的纵向动力学、转向系统的横向动力学及悬架系统的车辆垂向动力学的综合平衡、全面协调。在底盘系统的历次演化过程中,集成制动、转向及差速转向,甚至悬架功能集的轮毂电机主动轮概念,为上述发展趋势提供了更有效的解决方案。其主要思想是将汽车底盘动力学系统与车身其他系统分离,并将汽车动力学纵向、横向、垂向控制系统功能集成。这样的底盘功能化发展趋势,不仅提高了控制系统的可靠性和有效性,而且易于避免底盘功能耦合与控制目标矛盾,具有“高性能内聚、低系统耦合”的优点。促进并实现新一代电动化智能汽车底盘系统的空间立体化控制,是今后汽车动力学控制系统的重要发展方向。

而要实现这一目标还需要解决以下几个关键问题:关键执行器的性能改进和一体化优化设计;底盘底层控制系统的重构与全方位底盘控制;整车多自由度姿态控制;执行器的接口标准化与汽车开放性系统构架;新式底盘系统的测试技术和方法;电动汽车与线控技术安全性。

参考文献

[1] JEFFREY W, ZHOU Y L, DONG Z M. Review of multi-regime hybrid vehicle powertrain architecture [J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2008, 1(3): 248-275.
[2] MURATA S. Innovation by in-wheel-motor drive unit [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(6): 807-830.
[3] ZERAOUlia M, BENBOUZID M E H, DIALLO D. Electric Motor

- Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems; A Comparative Study [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55 (6):1756-1764.
- [4] 褚文强, 辜承林. 电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(4):1-5.
- [5] 宁国宝. 电动车轮边驱动系统的发展[J]. 上海汽车, 2006, (11): 2-6.
- [6] 陈辛波, 万钢, 余卓平, 等. 独立悬架-电动轮模块的双横臂悬架机构设计[J]. 汽车工程, 2004, 26(5):513-515, 520.
- [7] 彭文华, 秦建军. 电动轮驱动的混合动力汽车开发方案[J]. 汽车工程师, 2010, (10):37-40.
- [8] CONG G, MOSTEFAI L, DENAI M, et al. Direct Yaw-moment Control of an in-wheel-motored Electric Vehicle Based on Body Slip Angle Fuzzy Observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5):1411-1419.
- [9] JAIN M, WILLIAMSON S. Suitability Analysis of In-Wheel Motor Direct Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles [C]. Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Montreal: IEEE, 2009:1-5.
- [10] HOUYU Y, MIAOHUA H. Speed Regulation Control Combining Feedforward with Feedback of Hub Motor for Motor-Wheel Driving Electric Vehicle [C]. Electrical and Control Engineering (ICECE), Yichang: IEEE Press, 2011:4976-4979.
- [11] 靳立强, 王军年, 宋传学, 等. 电动轮驱动汽车驱动助力转向技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14):101-108.
- [12] WEISKIRCHER T, MÜLER S. Control Performance of a Road Vehicle with Four Independent Single-wheel Electric Motors and Steer-by-wire system [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1):53-69.
- [13] CHEN Y, HEDRICK J K, GUO K. A Novel Direct Yaw Moment Controller for in-wheel Motor Electric Vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(6):925-942.
- [14] CAKIR K, SABANOVIC A. In-Wheel Motor Design for Electric Vehicles [J]. Paper Read at Advanced Motion Control, 2006, 19 (23):613-618.
- [15] CANIBANO E, GONZÁLEZ M, PRADA L, et al. Development of Mathematical Models for an Electric Vehicle With 4 In-Wheel Electric Motors [J]. Advanced Microsystems for Automotive Applications, 2011, (1):13-21.
- [16] YU Z P, YUAN F, LU X, et al. Vehicle Mass Estimation for Four In-Wheel-Motor Drive Vehicle [J]. Electrical Engineering and Control, 2011, 98:117-125.
- [17] SERGIO R P. Analysis of a Light Permanent Magnet in-wheel Motor for an Electric Vehicle with Autonomous Corner Modules [M]. Stockholm: Royal Institute of Technology Press, 2011.
- [18] MATS J. Aspects of Autonomous Corner Modules as an Enabler for New Vehicle Chassis Solutions [M]. Stockholm: Royal Institute of Technology Press, 2006.
- [19] MATS J. Exploiting Individual Wheel Actuators to Enhance Vehicle Dynamics and Safety in Electric Vehicles [M]. Stockholm: Royal Institute of Technology Press, 2009.
- [20] PRABHU S, CHANDRASEKAR V, KARTHIKEYAN P, et al. Vibration and Thermal Analysis of Switched Reluctance Hub Motor [J]. European Journal of Scientific Research, 2012, 68(1):12-20.
- [21] LI J, SONG X G, CHO Y. Comparison of 12/8 and 6/4 Switched Reluctance Motor; Noise and Vibration Aspects [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11):4131-4134.
- [22] SHIN D J, KWON B I. Multi-objective Optimal Design for In-Wheel Permanent Magnet Synchronous Motor [C]. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Tokyo: IEEJ Industry Applications Society. Press, 2009:1-5.
- [23] 于增亮, 张立军, 孙北, 等. 轮毂电机驱动电动微型车车内噪声道路试验分析[J]. 上海汽车, 2009, (8):8-13.
- [24] 宁国宝, 王永湛, 余卓平, 等. 悬架系统非线性特性对车辆垂向性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8):1065-1069.
- [25] 宁国宝, 万钢. 轮边驱动系统对车辆垂向性能影响的研究现状[J]. 汽车技术, 2007, (3):21-25.
- [26] 夏存良, 宁国宝. 轮边驱动电动车大质量电动轮垂向振动负效应主动控制[J]. 中国工程机械学报, 2006, 4(1):31-34.
- [27] 梁锐, 余卓平, 宁国宝, 等. 基于吸振原理的轮边驱动电动车垂向振动负效应的抑制[J]. 机械设计, 2008, 25(1):28-30.
- [28] Hag J. Wheel Corner Modules: Technology and Concept Analysis [C]. Trita-AVE, Stockholm: KTH Engineering Sciences Press, 2011.
- [29] 赵艳娥, 张建武, 韩旭, 等. 轮毂电机独立驱动电动汽车动力减振机构设计与研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(3):395-398.
- [30] JIN LIQIANG, SONG CHUANXUE, WANG QINGNIAN. Evaluation of Influence of Motorized Wheels on Contact Force and Comfort for Electric Vehicle [J]. Journal of Computers, 2011, 6(3):497-505.
- [31] AHDERSON M, HARTY D. Unsprung Mass With In-Wheel Motors - Myths and Realities [C]. International Symposium on Advanced Vehicle (AVEC), Loughborough: Springer Press, 2010.
- [32] ROJAS A, NIEDERKOFER H, WILLBERGER J. Comfort and Safety Enhancement of Passenger Vehicles with In-Wheel Motors [J]. SAE Technical Paper, 2010, 2010(01):1140-1146.
- [33] MASSIMO C, ANDREA G, MATTEO C P. Cornering Stability and Dynamic Analysis of a Four Steering Wheels Vehicle Driven by "In Wheel" Engines [C]. Proceedings of EUCOMES, Cassino: Springer Press, 2009.
- [34] LU X, YU Z P. Research on Robust Control for Longitudinal Impact of 4 Wheel-Drive Hybrid Electric Vehicle [J], Procedia Engineering, 2011, 15:293-297.
- [35] WANG J, SHEN S W. Integrated Vehicle Ride and Roll Control Via Active Suspensions [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(s1):495-508.
- [36] LIN J, LIAN R. DSP-based Self-organising Fuzzy Controller for Active Suspension Systems [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(12):1123-1139.
- [37] LIN J K, CHENG KWE, ZHU Zhang, et al. Active Suspension System Based on Linear Switched Reluctance Actuator and Control Schemes [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on 2013,

- 62(2):562-572.
- [38] WANG J, WANG W, ATALLAH K, et al. Comparative Studies of Linear Permanent Magnet Motor Topologies for Active Vehicle Suspension[C]. Proceedings of the Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 08. IEEE, Harbin: IEEE Press, 2008.
- [39] MATS J, FREDRIK R. Design and Evaluation of an Active Electromechanical Wheel Suspension System [J]. Mechatronics, 2008, 18(4):218-230.
- [40] 喻凡, 曹民, 郑雪春, 等. 能量回馈式车辆主动悬架的可行性研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4):27-30.
- [41] 欧阳冬, 张克跃, 张继业, 等. 车辆能量回馈式主动悬架系统研究[J]. 振动与冲击, 2008, (8):88-92.
- [42] LEI Z, BRIAN S, JURGEN S, et al. Design and Characterization of an Electromagnetic Energy Harvester for Vehicles Suspensions [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4):1-10.
- [43] GYSEN B, PAULIDES J, JANSSEN J, et al. Active Electromagnetic Suspension System for Improved Vehicle Dynamics [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3):1156-1163.
- [44] 罗虹, 陈星, 邓兆祥, 等. 主动悬架的直线电机作动器控制系统研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(7):1537-1542.
- [45] 来飞. 车辆主动悬架用电磁作动器温度场的有限元仿真分析[J]. 汽车技术, 2012, (2):35-38.
- [46] 邓兆祥, 来飞. 车辆主动悬架用电磁直线作动器的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14):121-128.
- [47] 阮德玉. 车辆主动悬架用永磁直线直流作动器的设计与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [48] 陈宏伟. 车辆节能型主动悬架的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [49] AMATI N, FESTINI A, ANDREA T. Design of Electromagnetic Shock Absorbers for Automotive Suspensions [J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(12):1913-1928.
- [50] ZHU Z, NORBERT C, CHEUNG K, et al. Application of Linear Switched Reluctance Motor for Active Suspension System in Electric Vehicle[C]. The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, Shenzhen: Society of Automotive Engineers of China, 2010.
- [51] PAULIDES J J H, ENCICA L, LOMONOVA E A, et al. Design Considerations for a Semi-Active Electromagnetic Suspension System [J]. Magnetics, IEEE Transactions, 2006, 42(10):3446-3448.
- [52] JANSSEN J L G. Design of Active Suspension using Electromagnetic Devices [D]. Eindhoven University of Technology, 2006.
- [53] GYSEN B, VAN DER SANDE T, PAULIDES J, et al. Efficiency of a Regenerative Direct-Drive Electromagnetic Active Suspension [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4):1384-1393.
- [54] LEE S, KIM W J. Active Suspension Control With Direct-Drive Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Motor [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(4):859-870.
- [55] KIM W J, BRYAN C M. Development of a Novel Direct-Drive Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Motor [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2004, 2(3):279-288.
- [56] JUSTIN A A. Design of Active Suspension Control Based Upon Use of Tubular Linear Motor and Quarter-Car Model [D]. College Station: Texas A & M University, 2008.
- [57] LEI Z, ZHANG P S. Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions [J]. Journal of Vibration and Acoustics 2013, 135(1):011002.
- [58] LEI Z, BRIAN S, JURGEN S, et al. Design and Characterization of an Electromagnetic Energy Harvester for Vehicle Suspensions [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4):1-10.
- [59] WANG J B, WANG W Y, Atallah K. A Linear Permanent-Magnet Motor for Active Vehicle Suspension [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1):55-63.
- [60] CLIPPARD R, ZIEGERT J. In-Wheel Coupled Suspension and Drive; Design, Development, and Modeling [J]. Sustainable Automotive Technologies, 2011, 6:131-138.
- [61] ROBERT M C. In-Wheel Coupled Suspension And Drive System For Attitude Control And Vehicle Propulsion [D]. Clemson: Clemson University, 2011.
- [62] BOLOGNESI P. Dual-function Wheel Drives Using Rotary-linear Actuators in Electric and Hybrid Vehicles[C]. Industrial Electronics, 2009 (IECON '09) 35th Annual Conference of IEEE, Porto (Portugal); IEEE Press, 2009.
- [63] KATSUYAMA E. Decoupled 3D Moment Control Using in-wheel Motors[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(1):18-31.
- [64] CHO W, YOON J, KIM J, et al. An Investigation into Unified Chassis Control Scheme for Optimised Vehicle Stability and Manoeuvrability [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46:87-105.
- [65] GAO H, LAM J, WANG C. Multi-objective Control of Vehicle Active Suspension Systems Via load-dependent Controllers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 290(3-5):654-675.
- [66] DE SANTIAGO J, BERNHOFF H, ERIKSSON S, et al. Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(2):475-484.
- [67] JONASSON M, ZETTERSTRÖM S, STENSSON T A. Autonomous Corner Modules as an Enabler for New Vehicle Chassis Solutions [R]. FISTA Transaction, 2006.
- [68] 陈祯福. 汽车底盘控制技术的现状和发展趋势[J]. 汽车工程, 2006, 28(2):105-113.
- [69] 宗长富, 刘凯. 汽车线控驱动技术的发展[J]. 汽车技术, 2006, (3):1-5.
- [70] 任桂周, 侯树展, 曲金玉, 等. 汽车电子新兴技术一线控制技术[J]. 汽车电器, 2007, (1):4-8.