

轮毂电机驱动技术研究概况及发展综述*

李勇¹, 徐兴¹, 孙晓东¹, 江浩斌², 曲亚萍³

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 江苏镇江 212013;

2. 江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江 212013;

3. 江苏大学管理学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 轮毂电机驱动技术代表着新能源汽车驱动系统的重要发展方向。介绍了轮毂电机驱动电动汽车的特点, 总结了轮毂电机驱动技术要求及驱动形式, 简要对比分析了国内外轮毂电机驱动形式的研究概况。提出了轮毂电机驱动技术亟待解决的关键问题, 探讨了降低非簧载质量、抑制垂向振动效应、降低轮毂电机转矩脉动等方面的核心技术, 预测了轮毂电机驱动技术的发展趋势。

关键词: 电动汽车; 轮毂电机; 永磁同步电机; 驱动系统; 发展

中图分类号: TM 384 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)06-0001-07

Review and Future Development of In-Wheel Motor Drive Technology*

LI Yong¹, XU Xing¹, SUN Xiaodong¹, JIANG Haobin², QU Yaping³

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In-wheel motor drive technology represents an essential development direction in new energy vehicle drive system. The technical requirements and drive form were introduced. The technical requirements and drive form of in-wheel motor drive were summarized. Current research situation of in-wheel motor drive technology was compared and analyzed briefly. The key technique problems of in-wheel motor technology were proposed. The essential technologies in decreasing unsprung mass, restraining vertical vibration effect and reducing torque ripple of in-wheel motor were discussed, which were supposed to be solved urgently. The development trend of in-wheel motor drive technology was predicted.

Key words: electric vehicle; in-wheel motor; permanent magnet synchronous motor; drive system; development

0 引言

随着能源短缺和环境污染问题的日益突出, 大力开发节能与环保的新能源汽车已经成为当今世界汽车工业发展的必然选择。纯电动汽车以其高效、无污染、低噪声等突出优点在近几年得到了迅速发展^[1-2]。轮毂电机驱动式电动汽车具有结构简单紧凑、传动系统高效节能、驱动和制动转矩

独立可控等多个方面的独特优势, 代表着下一代电动汽车发展的重要方向^[3]。

轮毂电机作为电动汽车驱动系统的核心部件, 其性能至关重要。由于轮毂电机安装在狭小的轮毂空间内, 使电机系统受温升、磁场饱和、路面激励(振动、冲击)、转矩波动、负载突变等因素影响显著, 严重制约着轮毂电机的控制性能^[4]。此外, 由于轮毂电机的引入, 汽车非簧载质量增

* 基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20160525); 江苏省“六大人才高峰”项目(2014-JXQC-004); 江苏省电动车辆驱动与智能控制重点实验室开放基金资助项目(JLDICEV20150704); 江苏大学高级人才科研启动基金资助项目(15JJDG110、15JJDG164); 汽车测控与安全四川省重点实验室开放基金项目(SZJJ2017-076)

作者简介: 李勇(1986—), 男, 研究方向为电动汽车电机驱动与控制。

加,降低了汽车的平顺性和安全性。随着新能源汽车的发展,轮毂电机已成为目前电动汽车领域的研究热点。

本文介绍了轮毂电机驱动电动汽车的特点,总结了轮毂电机驱动技术要求及驱动形式,对比分析了国内外轮毂电机驱动形式的研究概况。针对轮毂电机驱动技术急需解决的关键问题和核心技术进行了探讨,并预测了轮毂电机驱动技术未来的发展趋势。

1 轮毂电机驱动电动汽车特点

与传统集中式汽车相比,采用轮毂电机驱动形式的电动汽车具有以下特点:

(1) 传动效率提高。取消了发动机、离合器、变速器、传动轴及主减速器等装置,较大程度地简化了动力传动系统结构,传动效率大幅度提高。

(2) 底盘结构简化。轮毂电机驱动电动汽车的底盘架构大大简化,节省了车内空间,车体空间利用率高。

(3) 轴荷分布合理。整车布置设计灵活,整车质量分布设计自由度大,使得轴荷分布更为合理。

(4) 驱动系统布置灵活。轮毂电机驱动技术增加了整车动力系统布置的灵活性,通过对驱动形式和驱动轮的协调控制,实现电动汽车的多轴多轮驱动,满足不同工况下的行驶需求。

(5) 车辆行驶稳定性提高。轮毂电机驱动技术通过对不同车轮的转速、驱动或制动转矩进行独立控制实现对电动汽车底盘的控制,轮毂电机的转矩响应速度和响应精度对车辆行驶稳定性提高具有重要影响。

(6) 再生制动回收率提高。电动汽车轮毂电机驱动系统采用机电复合制动或电制动实现能量的回收利用,降低能耗,提高电动汽车续航里程。

2 轮毂电机驱动技术要求及驱动形式

2.1 轮毂电机驱动技术要求

考虑到电动汽车运行工况的复杂性,并结合轮毂电机驱动方式的特点,对轮毂电机的技术要求主要包括:(1)由于汽车自重和轮毂空间有限,要求轮毂电机具有较高的转矩密度;(2)为满足汽车的快速起动、加速、爬坡和频繁起停等要求,轮毂电机应具有非常宽的调速范围和较强的抗过载能力,且在

较宽的转速、转矩工作区域内能保持较高的效率;(3)轮毂电机应能承受高温、低温、剧烈振动和多变天气的影响,在各种恶劣环境下能够正常工作;(4)在多种复杂行驶工况下,轮毂电机应具有较强的抗干扰能力和较高的控制精度。

直流电机、感应电机、永磁同步电机和开关磁阻电机都已经广泛应用于电动汽车驱动系统。与其他驱动电机相比,永磁同步电机具有体积小、质量轻、响应快、效率高等优点。此外,永磁同步电机除了具有高功率密度、高转矩密度和高效率外,还具有独特的弱磁扩充能力,永磁同步电机在电动汽车驱动系统得到越来越多的应用。永磁同步电机能够满足上述轮毂电机技术要求,因此,永磁同步电机是电动汽车轮毂电机的最佳选择。

2.2 轮毂电机驱动形式

按照驱动电机转子类型不同,轮毂电机分为高速内转子电机和低速外转子电机两类。

2.2.1 内转子轮毂电机

高速内转子轮毂电机的最高转速为 15 000 r/min。为了满足车轮实际转速的要求,需要与减速装置配合使用,来达到减速增扭的目的。内转子轮毂电机对电机要求不高,但是由于引入了减速机构,使轮毂电机结构变得复杂,并增加了汽车非簧载质量。除此之外,减速机构磨损较快,容易造成轮毂电机使用寿命缩短、不易维护等缺陷。

日本对高速内转子轮毂电机的研究较为深入,庆应义塾大学等多家单位研发的 ECO、东京大学研制的 UOT March II、三菱公司开发的 Colt EV、Keio 大学研发的 Colt KAZ、丰田公司开发的 FINE-T 等电动汽车均采用行星齿轮作为内转子轮毂电机的减速机构^[5]。英国 QinetiQ 公司电驱动汽车配以减速箱作为轮毂电机减速机构。此外,NTN 公司研制的铃木雨燕电动汽车 Q' mo 采用摆线式齿轮作为轮毂电机的减速机构。法国米其林公司研制了用于电动汽车的主动车轮,该主动车轮集成了驱动电机、主动悬架、悬挂电机及盘式制动器等部件。由于米其林公司的主动车轮具有优越的性能,法国跑车公司 Venturi 所研发的四轮驱动跑车 Venturi Volage 就采用了该主动车轮技术。米其林公司开发的内转子轮毂电机如图 1 所示。



图1 米其林公司开发的内转子轮毂电机

上述部分电动汽车内转子轮毂电机参数如表1所示。

表1 内转子轮毂电机参数

电动汽车型号	研发单位	轮毂电机最高转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	电机最大功率/ kW	轮毂电机减速比
UOT March II	东京大学	8 700	36	5:1
Colt EV	三菱公司	9 000	20	6:1
KAZ	Keio	12 000	55	4.588:1
Q' mo	NTN公司	15 000	5	11:1
Qineti Q	Qineti Q公司	9 000	100	2:1

2.2.2 外转子轮毂电机

低速外转子轮毂电机直接驱动车轮,无须配以减速机构。外转子轮毂电机的转速最高为2 000 r/min。与内转子轮毂电机相比,外转子轮毂电机结构简单紧凑,轴向尺寸减小,传动效率进一步提高。但是,当汽车起步、爬坡时对电机转矩需求较大,由此引起的大电流容易使动力电池和永磁体损坏。

日本庆应义塾大学等单位研制的电动汽车IZA、三菱公司研发的Lancer Evolution MIEV、英国PML Flightlink公司推出的Volvo Recharge C30和Ford0150、通用公司研制的GM's S10、英国Protean Electrics推出的Protean Drive、日本普利司通公司以及加拿大TM4公司研发的轮毂电机均采用外转子轮毂电机驱动方式^[6]。Protean Electrics公司开发的外转子轮毂电机如图2所示。



图2 Protean Electrics公司开发的外转子轮毂电机

上述外转子轮毂电机的参数如表2所示。

表2 外转子轮毂电机参数

电动汽车型号	研发单位	轮毂电机最高转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	电机最大功率/ kW	电机最大扭矩/ ($N \cdot m$)
Lancer	三菱公司	1 500	50	518
Volvo, Ford	PML Flightlink	2 000	120	750
GM's S10	通用公司	1 200	25	500
Bridgestone	丰田公司	1 800	24.3	520
TM4	TM4	1 385	18.5	670
BRABUS	Protean Electric	1 600	75	1 000

与国外相比,我国轮毂电机驱动式电动汽车的研发工作起步较晚。同济大学新能源汽车工程中心等单位联合研制了“春晖”、“登峰”系列电动汽车,轮毂电机最高转速为510 r/min,汽车最高时速为50 km/h。比亚迪公司研发了ET轮毂直驱式纯电动汽车,轮毂电机最高转速为5 500 r/min,最高车速为165 km/h。奇瑞汽车公司研制并在上海车展上展示了“瑞麒”X1电动汽车,轮毂电机最大功率为166 kW,最大扭矩为1 650 $N \cdot m$ 。此外,广州汽车集团在广州车展上推出了“传祺”电动汽车,采用Protean Electric公司的轮毂电机,电机最大功率为83 kW,最大扭矩为825 $N \cdot m$ 。国内汽车生产厂商、高校及科研院所具备了一定的电动汽车开发能力,但对轮毂电机驱动技术的研究仍不成熟,与国外先进技术相比仍存在较大差距^[4,7]。因此,对电动汽车轮毂电机领域进行研究,增强自主创新意识,发展具有自主知识产权的轮毂电机驱动技术,提高我国电动汽车核心部件的量产能力,对促进电动汽车产业的发展具有重要的现实意义。

3 轮毂电机驱动技术研究概况及现存问题

尽管轮毂电机驱动技术具有一系列的优点,但是由于轮毂电机的引入所导致的汽车非簧载质量增加、垂向振动负效应、轮毂电机转矩脉动等问题对汽车动力学性能和安全性有着至关重要的影响,上述问题均制约着轮毂电机驱动技术的发展。针对上述问题,国内外学者分别从降低非簧载质量、抑制垂向振动负效应、改善轮毂电机转矩特性等方面进行了大量的研究。

3.1 降低非簧载质量

轮毂驱动式电动汽车不仅取消了发动机、离合器、变速器、传动轴等装置,而且在轮辋内部安装了轮毂电机,造成簧载质量减少、非簧载质量显著增加的后果。非簧载质量过大对汽车行驶平顺性有影响,对高速行驶在路况差的路面上的车辆更为明显^[7]。目前,国内外降低非簧载质量的方法主要有轻量化设计和非簧载质量转换两种方法。

(1) 轻量化、一体化设计。轻量化设计主要是指选择材料为铝、镁合金的悬架、轮辋及其他零部件,或者从结构上将电机、轮辋、轮毂、轮毂轴承和制动系统等部件一体化设计。目前,BMW、Audi A8等汽车广泛采用铝合金悬架或轮毂,大大降低了整车质量^[8]。同济大学将悬架与电动轮模块进行高度集成,较大程度减轻了车辆底盘结构。新型稀土材料钕铁硼被越来越多应用于轮毂电机的生产工艺中,王晓远等^[9]设计的盘式无铁心永磁轮毂电机具有较高的功率密度、输出转矩以及较宽的调速范围等。柴凤等^[10]将永磁材料与软磁材料相结合,设计了轴向磁通反凸极永磁轮毂电机,解决了弱磁扩速能力弱等问题,提高了永磁体和轮毂空间的利用率。文献^[11]提出了轮毂电机、轮辋和轮毂等其他零部件的一体化设计方法,从而达到改善汽车垂

向动力学性能的目的。

(2) 非簧载质量转移。余志生^[12]指出簧载质量与非簧载质量比值减小时,车辆平顺性指标在车轮共振峰值附近性能均有所下降,车轮相对动载荷变化较大,须降低车轮相对动载荷。Hredzak等^[13]设计了盘式轮毂电机,将电机定子质量转化为车辆簧载质量,实现了非簧载质量的转移。文献^[14]将轮毂电机悬置元件转换为吸振器质量,提高了整车行驶平顺性。赵艳娥等^[15]提出了新型的轮毂电机布置形式,利用减振装置实现了轮毂电机定子质量由簧载质量向非簧载质量的转移,但是该方法易造成轮毂电机定转子之间的偏心现象,从而影响车辆动力学性能。Jin L Q等^[16]通过引入万向节将轮边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,提高了汽车平顺性并降低了轮胎动载荷。罗玉涛、谭迪^[17]将轮毂电机与非簧载质量进行弹性隔离,将轮毂电机转换为与簧载质量并联的质量,增大了簧载质量和非簧载质量的比例,所设计的新型轮毂电机结构原理图如图3所示。图3(a)为内转子轮毂电机结构,该结构含有减速机构;图3(b)为外转子轮毂电机结构,该结构不包含减速机构。

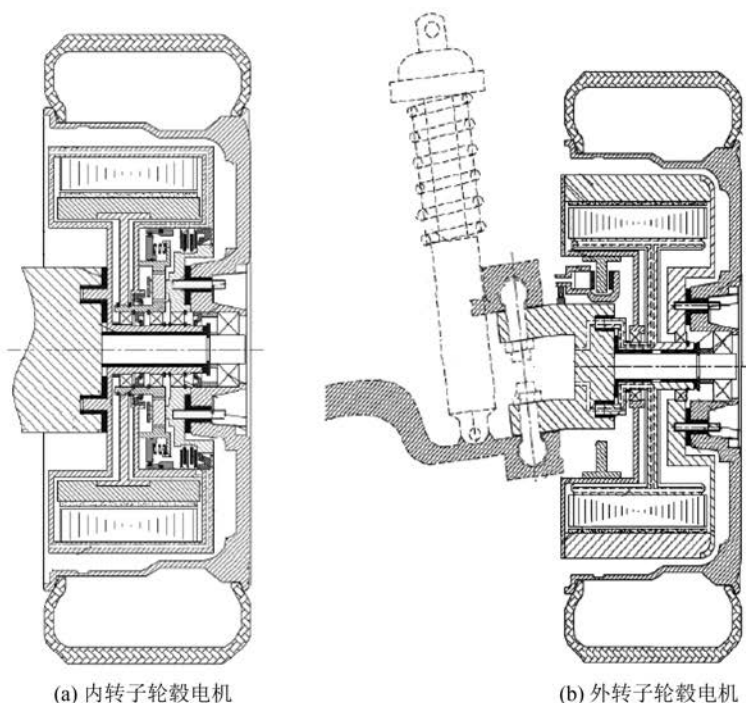


图3 新型轮毂电机结构图

3.2 抑制垂向振动负效应

由于整车非簧载质量以及车轮转动惯量的增加将造成轮毂电机垂向振动负效应,对轮胎的接地性能和汽车行驶平顺性造成恶劣影响,严重时将导致汽车发生侧滑或侧翻,大大降低汽车安全性。为了提高轮毂驱动式电动汽车的舒适性,必须寻求解决汽车垂向振动负效应的方法。目前,国内外轮毂电机抑制垂向振动负效应方法如下。

(1) 动态吸振器及减振装置设计。文献[18]提出了采用动态吸振装置将轮毂电机转化为吸振器质量元件的轮边驱动系统设计方法,整车平顺性和安全性得到了较大提高。文献[19]通过在车轮转向节上安装动态吸振器的方法实现了车辆行驶平顺性的提高。马英等^[18]通过在轮毂电机和车轮之间设计减振装置使得轮毂电机部分质量悬浮在车轮内,轮毂电机同时作为车身和车轮动态吸振器,如图4所示。该方法在一定程度上提高了车辆行驶平顺性,但是由于弹簧和阻尼吸振器在轮毂空间内的设计难度较大,且当车身、车轮、轮毂电机质量发生变化时需要吸振器参数进行重新计算。

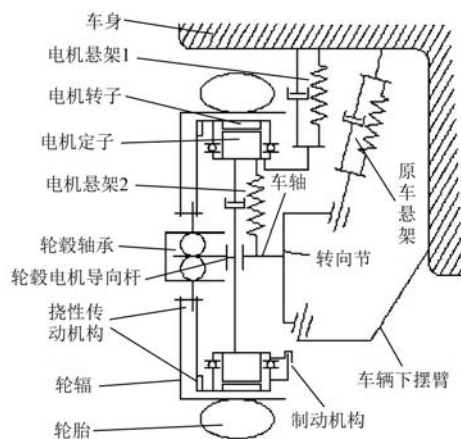


图4 电动车轮减振装置结构

(2) 悬架系统改进。可对主动悬架、半主动悬架、被动悬架系统进行改进,设计新的悬架结构,选用低刚度、低坡阻轮胎。王艳阳等^[20]设计了馈能型磁流变半主动悬架减振器,如图5所示,采用功率流方法分析了馈能型悬架的馈能特性,结果表明馈能型磁流变半主动悬架的馈能特性得到了提升。

随着新技术和新产品的不断出现,传统悬架

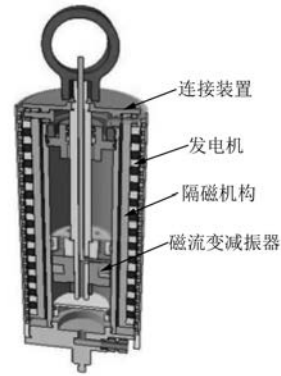


图5 馈能型悬架减振器结构图

终将被新型智能悬架所代替。西门子公司研制的eCorner电动轮汽车和米其林公司推出的主动车轮技术将轮毂电机与智能悬架相结合,有效提高了电动汽车的行驶平顺性和操纵稳定性^[21]。开发拥有自主知识产权的轮毂电机驱动电动汽车新型智能悬架系统及其控制策略不仅成为了电动汽车研究的重要发展方向,而且对我国“十三五”关于新能源汽车的发展规划具有重要的理论意义和工程应用价值。

3.3 降低轮毂电机转矩脉动

国内外进行了大量的研究工作,结果表明轮毂电机扭矩脉动是影响汽车行驶平顺性的主要因素。根据转矩脉动产生机理的不同,轮毂电机转矩脉动主要是由齿槽转矩波动和换相转矩波动造成的。因此,抑制轮毂电机转矩脉动主要从轮毂电机优化设计和电机控制策略方面进行。国内外众多专家学者对抑制轮毂电机转矩脉动进行了深入的研究。

Prabhu S^[22]认为轮毂电机振动强度受定子形状及电机转动周期的影响,振动幅值较小时可以简化为模态的线性叠加。Rojas A等^[23]研究了在不同轮毂电机驱动扭矩下,采用不同类型悬架解决汽车平顺性和操作稳定性恶化的措施,探索了轮边驱动电动车动力性与安全性、舒适性之间的关系。于增亮等^[24]对轮毂直驱式电动汽车车内噪声进行了研究,认为轮毂电机转矩脉动引起车轮周向力矩波动是引起动力总成振动的主要因素。左曙光等^[25]研究了高频转矩信号激励下电动轮的振动响应,分析了轮胎接地力与转矩脉动之间的关系。Tan D等^[26]应用Maxwell应力张量

法,推导出轮毂电机电磁力解析表达式,并将其代入车辆悬架动力学方程,对电磁复合激励下悬架振动响应特性进行计算,所得时变偏心下定转子相对位移量的时域、频域响应如图6所示。

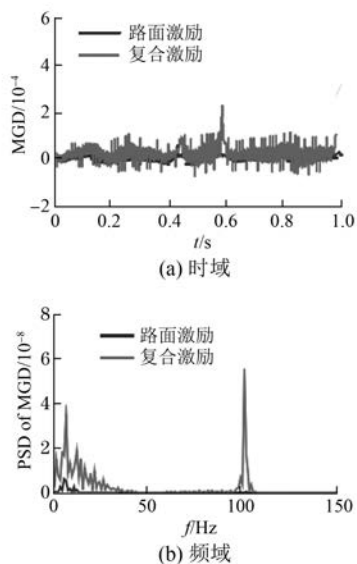


图6 定转子相对位移量

此外,还可以通过对电流谐波、转子偏心、定子固有频率等因素进行研究达到降低轮毂电机转矩脉动的目的。

4 轮毂电机驱动技术发展趋势

(1) 轻量化。轮毂驱动式电动汽车驱动系统由轮毂电机、制动器、轮辋、轮毂、轮胎、传动及轴承等构成,各部件均可采用尺寸优化、结构优化及新型材料选择等方法实现轻量化。轮毂电机的轻量化可以通过提高功率密度、电机结构优化设计等方法实现。

(2) 一体化。为了使轮毂电机驱动技术有效地运用在电动汽车上,必须在现有电动汽车底盘基础上对其进行改造,调整整车悬架结构及参数,将轮毂电机与悬架进行集成,保持簧载质量和非簧载质量的比例,开发出适合轮毂电机搭载的汽车底盘,发挥并体现出轮毂电机的优越性。融合车轮、轮毂电机等关键部件的一体化轮毂电机驱动系统是今后需要研究的关键技术。

(3) 轮毂电机冷却技术。电动汽车运行工况复杂多变,轮毂电机安装在狭小的车轮内,容易出现冷却不足导致电机过热。汽车制动时,制动器

产生较多热量,热量会直接传到电机上,导致电机过热。当永磁材料达到 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时会导致退磁现象,从而直接影响整车性能。目前轮毂电机冷却系统还不够完善,开发合适的轮毂电机冷却系统,通过风冷、水冷等方式分别对转子、定子进行降温处理,从而避免永磁材料退磁。

(4) 永磁材料退磁抑制技术。能量密度较大的永磁轮毂电机代表着今后轮毂电机的发展方向。除了热退磁外,永磁轮毂电机在高强度振动情况下也会产生退磁现象,这是由永磁材料决定的。开发耐冲击和振动的永磁材料,较大程度抑制永磁轮毂电机退磁是今后研究的重点。

(5) 转矩脉动抑制技术。解决轮毂电机在电磁、温度、应力等多场耦合作用下的转矩脉动问题,对电机参数进行修正补偿控制,降低电机转矩波动,提高轮毂电机转速、转矩控制精度,改善轮毂电机控制性能。轮毂电机驱动技术在不同类型汽车中的应用日益增多,提高不同运行环境、不同工况下多个轮毂电机之间的转速、转矩协调控制性能是今后轮毂电机驱动技术的发展方向。

(6) 电子差速控制技术。由于取消了传统车辆的机械传动部分,轮毂电机直接驱动车辆行驶,当车速超过某一定值时,汽车将出现明显的失稳现象。目前国内外电子差速控制技术还处于起步积累阶段,这就要求轮毂电机电子差速控制技术必须要进行攻关,使得电子差速技术水平超过传统机械差速器。

(7) 无传感器控制技术。虽然可以通过机械传感器方便准确地获得轮毂电机转子信息,但是同时也增加了转子的转动惯量。另外,机械传感器不仅存在恶劣工况下传感器灵敏度变差、安装不准确引起换相误差等缺陷,而且还增加了系统成本和维修难度。传统机械传感器已经无法满足永磁轮毂电机转速、转矩精准控制的要求。近年来,随着电机技术的发展以及无传感器控制技术的不断完善,电动汽车轮毂电机无传感器控制必然成为轮毂电机驱动技术的发展方向。

(8) 协调控制技术。轮毂电机成对(至少1对)应用到车辆上,不仅要求车身左右两边对称的轮毂电机性能上具有一致性,而且要求多个电机的转矩能够进行同步协调控制,保证车辆在各种行驶条件下安全行驶。此外,轮毂电机行驶时

的振动加速度较大,为延长轮毂电机的使用寿命,应具有较好的耐久性。

(9) 智能化。随着智能网联汽车技术的发展,新能源汽车的环境感知能力不断增强,控制算法不断改进,轮毂直驱式电动汽车将朝着网联化、智能化、无人化方向发展,未来汽车可以称之为“轮式移动机器人”。这一发展趋势必将倒逼轮毂电机驱动系统关键技术(如转速调节、转矩分配、制动控制、电子差速控制、能量管理控制策略、冷却系统控制、总线控制等)往智能化、电子化、信息化方向发展。

(10) 低成本化。在新能源汽车中,轮毂电机颠覆了传统汽车的动力系统,是一种全新的驱动方式。从研究角度来说,轮毂电机让人们对未来驱动技术的发展十分乐观,但是由于其成本一直居高不下,轮毂电机驱动技术的大规模商业化应用还不能实现。因此,降低轮毂电机驱动技术的成本必将增强该项技术的市场竞争力。

5 结 语

轮毂电机驱动技术代表着新能源汽车驱动系统的重要发展方向,对促进纯电动汽车产业的发展具有重要的理论意义和工程应用价值。但是,轮毂电机驱动技术仍面临很多亟待解决的关键技术问题,国内在轮毂电机驱动技术方面与国外相比还有较大差距。若未来实现轮毂电机大规模商业化应用,就必须克服轮毂电机驱动技术的瓶颈限制,在轮毂电机驱动系统关键技术领域取得突破,只有这样轮毂电机才能够拥有广阔的市场应用前景。

【参考文献】

- [1] EHSANI M, GAO Y M, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles-fundamentals, theory and design, second edition [M]. US: CRC Press, 2010.
- [2] 李勇,杨耀东,马飞.矿用电动轮自卸车的概况及未来发展趋势[J].矿山机械,2010,38(14): 9-16.
- [3] 陈治宇,梁栋,李朝阳.基于新型摆线包络行星减速器的电动轮毂[J].机械传动,2014,38(8): 171-173.
- [4] 何仁,张瑞军.轮毂电机驱动技术的研究与进展[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2015,29(7): 10-18.
- [5] HE P, HORI Y, KAMACHI M, et al. Future motion control to be realized by in-wheel motored electric vehicle [C] // The 31st Annual Conference of IEEE, IECON 2005: 2632-2637.
- [6] NODA Y, KIRIYA T. Development of in-wheel motor drive system for 4WD bus [C] // Proceeding of EVS-22, Yokohama, 2006: 500-509.
- [7] RAHMAN K, PATEL N, CARICCHI F. Application of direct drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion [C] // Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, 2004(3): 1420-1426.
- [8] RMSDEN V S R. Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle [J]. Journals & Magazines, 1998, 145(5): 402-408.
- [9] 王晓远,高鹏,赵玉双.电动汽车用高功率密度电机关键技术[J].电工技术学报,2015,30(6): 53-59.
- [10] 柴凤,毕云龙.轴向磁场永磁同步电机弱磁方法综述[J].微电机,2015,48(2): 69-76.
- [11] 杨蔚华,李友荣,方子帆,等.新型轮边驱动电动车平顺性仿真分析[J].计算机仿真,2015,32(3): 177-182.
- [12] 余志生.汽车理论[M].5版.北京:机械工业出版社,2015.
- [13] HREDZAK B, GAIR S, EASTHAM J F. Control of an EV drive with reduced unsprung mass [J]. IEEE Transactions on Electric Power Applications, 1998, 145(6): 600-606.
- [14] NAGYA G. Development of an in-wheel drive with advanced dynamic-damper mechanism [J]. JSAE Review, 2003, 24(4): 477-481.
- [15] 赵艳娥,张建武,韩旭.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): 395-404.
- [16] JIN L Q, SONG C X, WANG Q N. Evaluation of influence of motorized wheels on contact force and comfort for electric vehicle [J]. Journal of Computers, 2011, 6(3): 497-505.
- [17] 罗玉涛,谭迪.一种带新型内置悬置系统的电动轮结构研究[J].汽车工程,2013,35(12): 1105-1110.
- [18] 马英,邓兆祥,谢丹.电动轮车辆轮内主动减振系统设计与研究[J].系统仿真学报,2014,26(11): 2770-2778.
- [19] 梁锐,余卓平,宁国宝.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,2008,1(25): 28-30.

(下转第 18 页)