

电动汽车轮毂电机技术的发展现状 与发展趋势*

孔垂毅, 代颖, 罗建

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 轮毂电机具有结构紧凑、传动效率高、控制和转向灵活等优点。由轮毂电机驱动的电动汽车是新能源汽车重要的发展方向。通过各种电机的对比, 认为永磁同步电机效率高、功率密度高、可靠性好, 是轮毂驱动电机一个较好的选择。总结了电动汽车轮毂电机国内外的应用概况, 介绍了轮毂电机电磁设计优化、控制策略及散热方式和结构方面进行的研究和工作, 最后探讨了我国电动汽车轮毂电机研究中存在的问题, 展望了轮毂电机未来的发展方向。

关键词: 轮毂电机; 电动汽车; 永磁同步电机; 电磁设计及优化; 散热

中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0101-08

Development Status and Trend of In-Wheel Motor Technology for Electric Vehicles*

KONG Chuiyi, DAI Ying, LUO Jian

(School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200072, China)

Abstract: In-wheel motor had the advantages of compact structure, high transmission efficiency, flexible control and steering, etc. Electric vehicle driven by in-wheel motor was an important development direction of new energy vehicle in the future. Permanent magnet synchronous motor was a better choice for in-wheel drive motor because of its high efficiency, high power density and good reliability. The application situation of in-wheel motor to electric vehicle at home and abroad was summarized, and the research and work of electromagnetic design optimization, control strategy, heat dissipation mode and structure of in-wheel motor were introduced. Finally, the problems of in-wheel motor in China were discussed, and the future development directions of in-wheel motor were prospected.

Key words: in-wheel motor; electric vehicle; permanent magnet synchronous motor (PMSM); electromagnetic design and optimization; cooling

0 引言

能源与环境问题日益成为制约人类社会发展的
重要因素, 节能环保的电动汽车的兴起已成必然^[1-2]。轮毂电机驱动方式, 是将 2 个或者更多

的电机安装在车轮内部, 如 Protean Driver TM 系
统安装的电机可以达到 8 个, 与内燃机汽车和单
电机集中驱动电动汽车相比有很大的优势^[3-6]。

(1) 动力系统由机械传动硬控制改为电子系
统软控制, 通过电力电子等技术, 可以实现电机的

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0104801)

作者简介: 孔垂毅(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器、电机热分析。

代颖(1980—), 女, 博士后, 副教授, 研究方向为电机设计、电机的振动噪声、电机的多物理场分析。

罗建(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为广域高效永磁同步电机、新颖电机拓扑结构、电机系统控制策略、振动与噪声等。

无级调速和各个车轮间的差速要求,省去了中央驱动形式汽车所需的机械式换挡装置、离合器、变速器、传动轴等。因此,驱动系统更加简单高效,整车结构简洁,可利用空间加大,传动效率因传动结构简化而有所提高,底架结构更为平坦,整车设计的自由度增大。

(2) 各个电机的转矩和转速可以由电子设备直接控制,控制更为方便和灵活,两侧的驱动轮之间没有刚性连接轴,不需要机械差速器,在车辆转弯时可通过分别调节两侧驱动轮的转速大大减小车辆的转弯半径,在极限情况下甚至可以实现零半径转向。

(3) 容易实现电动轮的电气制动和机械混合制动,具有良好的再生制动性能,效率可达 80% 以上;驱动系统省去了传动机构,可减少传动系统中的机械摩擦和损耗,提高传动效率。

轮毂电机由于其独特的优势,逐渐成为学者研究的热点。虽然轮毂电机驱动电动汽车有较大的优势,但也有一些技术难点。其安装空间狭小,要满足高功率密度、高转矩密度等要求,对电机本体就有较高的要求;轮毂电机经常工作在高温高压等复杂的环境下,发热散热是一个重要的设计内容。簧下质量增加的问题则没有想象中严重:Protean 公司相关资料表明,当簧下质量明显增加时,驾驶员一般无法察觉,通过在产品开发周期内

应用标准的工程工艺,即可轻松克服其变化程度;此外,对单个轮毂电机的控制能使车辆动力性、安全性、车辆性能和操控性得到大幅改善。

虽然轮毂电机驱动有不少技术难点,但其仍是电动汽车驱动方式的重要发展方向。我国轮毂电机研究起步较晚。因此,本文较全面地总结了电动汽车轮毂电机的应用和研究现状,并针对我国的轮毂电机技术研究提出了建议。

1 驱动形式和常见驱动电机

轮毂电机的驱动形式有 2 种:减速驱动和直接驱动。表 1 所示为 2 种驱动形式的比较。

减速驱动时,电机多采用内转子结构形式,电机转速较高,运行在高速状态下,需要齿轮箱减速装置,可以用来降低转速并增加转矩来适应车轮的输出需求。利用行星变速箱相对来说最有希望成功,其重量轻,仅 0.2~1.0 kg/kW,传动比高,可以达到 3:35。

直接驱动时,电机多采用外转子结构形式,电机转速较低,省去了减速机构,驱动系统重量轻。但是,无论是高速驱动还是低速驱动,车轮的转矩都比内燃机车辆的转矩低,电力驱动从零速度开始提供转矩,在零速度时较低的转矩会导致汽车的加速性能不是很优秀。

表 1 驱动形式比较

驱动形式	减速驱动	直接驱动
结构形式	内转子	外转子
转速	高(约 10 000 r/min)	低(1 000~1 500 r/min)
减速器	有(一般传动比约为 1:10)	无
优点	比功率较高,质量轻,体积小,噪声小,成本低	结构简单,轴向尺寸小,能在很宽的速度范围内控制转矩,且响应速度快,没有减速机构,效率高
缺点	必须采用减速机构,效率降低,非簧载质量增大,电机的最高转速受到线圈损耗、摩擦损耗以及变速机构的承受能力等因素的限制	要获得较大的转矩,必须增大电机的体积和质量,成本高
应用代表	日本的 ECO 和 KAZ,法国的米其林	Protean Electric,Elaphe Propulsion Technologies, SIM-Drive, 哈尔滨工业大学 EV96-1,同济大学春晖系列

可应用于轮毂电机驱动系统的电机应具有较大的调速范围和较高的转速,直流电动机(DCM)、永磁无刷直流电动机(BLDCM)、开关磁阻电动机(SRM)、异步电动机(IM)、永磁同步电动机(PMSM)等都可以作为轮毂电机使用。

DCM 可靠性差,寿命短,效率较低;BLDCM 调速困难,调速范围不大;IM 重量大,耦合性较强,线性度不好,控制方法复杂;SRM 振动大,噪声大,控制系统复杂;PMSM 效率高,功率密度高,可靠性好。

综上所述,PMSM 是一个较好的选择。

2 轮毂电机应用情况

早在 1900 年巴黎世博会上,电动车就首次向公众展示。20 世纪 50 年代,美国人罗伯特发明了一种将电动机、传动系统和制动系统融为一体的轮毂装置。该轮毂装置于 1968 年被通用公司应用在大型的矿用自卸车上。

在轮毂电机研究方面,日本起步较早,研究较为深入,技术比较领先。20 世纪 90 年代,日本庆应义塾大学清水浩教授领导的电动汽车研究小组研制的 IZA、KAZ、ECO 等电动汽车均采用轮毂电机驱动技术。IZA 电动汽车采用直接驱动方式,电机的外转子直接与轮毂相连,采用 4 个 25 kW 轮毂电机,续航里程 270 km,最高速度可达 170 km/h,但是只制造了 1 台样车^[7];KAZ 电动汽车采用减速驱动方式,使用盘式制动器,车轮比一般车辆的要小,因此其底盘降低,重心下降^[8];ECO 电动汽车采用后轮驱动,使用 BLDCM 作为驱动电机,额定功率 6.8 kW,峰值功率可达到 20 kW。

2011 年,SIM-Drive 公司创始人清水浩教授设计了 Eliica 电动汽车。该车采用 8 个独立的 60 kW 电机驱动,最大速度可达 370 km/h。同年,“SIM-LEI”电动汽车被研制出来,该车充电 1 次可行驶 308 km,0~100 km/h 加速时间为 4.8 s,最高车速可达 150 km/h。2014 年,SIM-Drive 公布了“SIM-WIL”电动汽车,该车提高了能量传递效率,增加了电池容量,充电 1 次可行驶 351 km。

2005 年,三菱公司与东洋公司合作开发了用于蓝瑟(Lancer)四轮驱动纯电动轿车的电动轮。每个电动轮最大功率为 50 kW,最大转矩为 518 N·m,最高转速为 1 500 r/min,最高车速可达 150 km/h,充电 1 次可行驶 250 km。

Protean 公司是一家全球领先的轮毂电机供应商,在外转子直接驱动方面技术成熟,处于世界领先水平。该公司的轮毂电机 Protean Driver TM 能提供 81 kW 的功率,800 N·m 的转矩,重量仅 31 kg,可安装在直径为 18~24 英寸(1 英寸≈2.54 cm)的常规车轮中。Protean Driver TM 轮毂电机具有良好的再生制动性能,在制动过程中可回收 85% 的动能,可增加 30% 以上的行驶里程,

保证续航里程的同时可以减少电池容量和成本。Protean Electric 公司已与多家整车厂商合作研发了多款装置轮毂电机的样车和改装车型,包括福特 F150-EV、Volvo、C30 Series HEV、沃克斯豪尔 Vivaro 货车、广汽传祺 Trumpchi EV 以及基于梅赛德斯奔驰 E 级的巴博斯纯电动与混合动力车型等。

2010 年,德国大众公司研制了 R-zero 概念车。该车结合了轮边电机驱动系统和锂电池蓄能器技术,0~100 km/h 的加速时间仅需要 2.9 s。按照设想,该车配备 4 个独立电机,每个电机搭配单独的 800 V 锂离子电池。在这种动力配置下,该车理论最大速度可达 460 km/h,但是该车还停留在概念上。

2013 年,福特与舍弗勒厂商共同开发出应用轮毂电机驱动技术的后驱嘉年华。该车的轮毂电机,单个重量为 53 kg,比一般的车轮装置重量高出不少。该车的轮毂电机采用水冷冷却,单个电机最大功率 40 kW,电机工作时平均输出功率为 33 kW,连续输出的平均功率为 66 kW,输出转矩可达 700 N·m。

我国轮毂电机起步较晚,但是随着 863 计划的深入,该技术也在逐渐深入。同济大学汽车学院在 2002 年和 2003 年独立研制的“春晖一号”和“春晖二号”由 4 个低速永磁无刷直流轮毂电机直接驱动。中国科学院北京三环通用电气公司开发出了电动汽车用的 7.5 kW 轮毂电机。哈工大爱英斯电动汽车研究所开发的 EV96 型电动汽车采用了多态轮毂电机的驱动系统,采用双边混合式磁路结构,具有同步电动机和异步电动机的双重特性,驱动轮额定功率 6.8 kW,最大功率 15 kW,最大转矩 25 N·m。清华大学、华中科技大学、吉林大学、重庆大学等高校也在积极研究轮毂电机技术。

广州汽车集团对轮毂电机新能源汽车研究比较深入,推出了新能源汽车 GE3、GS4 PHEV、GA3S PHEV 等。其中 GE3 是纯电动汽车,采用 PMSM 驱动,电机峰值功率可达 132 kW,峰值扭矩可达 290 N·m,最高车速可达 156 km/h。奇瑞汽车公司生产的瑞麟 X1-EV 电动汽车在上海车展上展出,四轮均由独立的轮毂电机驱动,相比集中驱动方式的电动汽车,可节省约 30% 的电池电

量。此外,我国公司泰特机电全资收购了荷兰 e-Traction 公司,万安科技则收购了美国 Protean Electric 公司 10.36% 的股权。

目前,我国轮毂电机技术与国外差距还比较大,技术尚不成熟,要广泛开展国际合作,努力赶上发达国家。

3 轮毂电机研究现状

3.1 轮毂电机电磁设计及优化

借助合理的电磁设计,PMSM 不仅能实现低的转矩脉动,减小噪声和振动,还能获得比较好的弱磁效果^[9-11]。PMSM 主要针对转子磁极进行优化,优化方法主要有转子周向分块、转子极弧削极等^[11]。在这方面,日本、英国起步早,研究较为深入,国内哈尔滨工业大学、沈阳工业大学等高校也有一定的科研成果。

2014 年,哈尔滨工业大学的 Li 等^[12]针对高速大转矩内 PMSM 转子机械强度问题进行了研究,确定了等效环法的精度应用条件,利用圆角和三角磁桥进行优化,最大变形比原始形变分别下降 0.014 mm 和 0.043 mm,结合安全气隙长度的调整,验证了该结构的优化方案可行,能够满足转子的机械强度要求。

Zhao 等^[13]提出一种转子永磁体轴向对称正弦分段的电机转子结构,通过与传统轴向分段以及永磁体轴向非对称正弦分段的比较可知,采用转子永磁体轴向对称分段技术对空载反电动势谐波含量、齿槽转矩和转矩波动的削弱效果最好。文献^[14]提出了一种同时在永磁体表面和定子齿上开凹槽的结构,优化后,齿槽转矩削弱了 62.8%,永磁体节省了 6.7%,转矩只有 6.5% 的下降^[14]。

Dajaku 等^[15]提出了一种应用于内置式 V 字型 PMSM 的不对称磁障结构,轴向分为两段,分别采用右偏移和左偏移的不对称磁障结构,通过优化 q 轴偏移角可以有效减小转矩脉动。Kim^[16]把转子轴向传统分段结构和不对称磁障结构的电机转矩性能进行了对比分析,二者均能抑制齿槽转矩和纹波转矩,转子轴向传统分段的电机转矩会减小,不对称磁障结构可以减小电枢反应,增大输出转矩。

2015 年,天津大学的王晓远等^[17]提出了基于进化策略(ES)^[18]的轮毂电机永磁体结构参数的

优化设计算法,以永磁体的结构尺寸参数为优化变量,电机性能表征量作为优化目标函数,取得了较为理想的齿槽转矩和电磁转矩,同时利用有限元法进行仿真,保证了电机性能的准确计算。韩国的 Chung 等^[19]对转子磁极进行优化,比传统的表贴式永磁电机减少了 33% 的永磁材料,同时还保持了几近相等的额定输出功率特性。

2016 年,上海大学的黄苏融等^[20]分析了剪切应力对电工钢片磁特性的影响,并提出考虑电工钢剪切应力的磁特性曲线拟合公式,采用 JMAG 软件建立模型并进行仿真,考虑电工钢剪切残余应力,铁心磁场密度降低,空载和负载情况下定子铁心损耗分别增加 10% 和 23.4%,更加贴近电机的实际情况。华中科技大学的 Ren 等^[21]提出一种不对称 V 字型转子结构,通过混合试验设计进行优化,齿槽转矩和转矩脉动明显减小且不受旋转方向限制。

2017 年,重庆大学的张羽等^[22]基于量子遗传算法,以电机有效质量、功率损耗和有效材料成本为优化目标,选取相应设计变量进行优化,优化后,电机质量较初始方案减少 10.16%,电机功率损耗降低 23.49%,电机有效材料成本减小 25.01%,电机效率提高 5.98%。文献^[19]提出两种改进的分段斜极策略,充分考虑了永磁体的斜极角度和轴向分段永磁长度对电机齿槽转矩的影响^[23]。

3.2 轮毂电机控制策略优化

电驱动系统是电动汽车能量转换的核心,其控制性能会影响整车的安全性和可靠性^[24-25]。为适应复杂多变的路况、频繁的起动制动等情况,高动态响应、高可靠性的控制策略是关键技术。国外尤其是美国、日本、德国等国家电动汽车控制系统的研究比较成熟,系统稳定性较高;国内有一定的研发能力,基本能满足电动汽车的要求,但与国际先进水平还有一定的差距。随着科学技术的发展,控制系统应该向着智能化发展,增加自学习能力,提高系统的适应力。

2014 年,Chen 等^[26]提出了一种将地形信息和执行器效率相结合的能量管理和驱动策略,以最小能量消耗的方式来延长电动汽车在车轮内的行程距离,在节能方面,有了很大的改善;在等速巡航时,有一个最优的速度,更高或更低的速度会

使车辆消耗更多的能量来完成整个行程。

彭思伦^[27]提出脉宽调制(PWM)变频控制策略和进角控制策略,PWM变频控制策略可提高电机逆变器的效率并利用谐波转矩增加低转速下电机的输出转矩,进角控制策略可以降低 d 轴电流,增加磁场定向的准确性,在高速下更为明显,运用这种策略可使转矩提高10%~15%。Zhao等^[28]提出了一种基于前转向角和牵引、制动力分布的非线性综合控制系统,该方法对车辆的横摆运动和侧滑运动有较大的改善。Yin等^[29]在直接横摆力矩控制基础上,提出一种新的电子稳定控制,以推进轮的独立牵引控制为核心,约束了纵向滑移,保证了二维运动控制的性能和有效性,在高速下,车辆可以保持接近中立的转向。

2015年,东南大学的樊英等^[30]提出了一种针对开绕组永磁复合轮毂电机(PMCM)的容错控制方法,在单相绕组开关管故障时,仍然能够进行矢量控制,为减少开关管的开关次数,提出了2个逆变器交替运行在钳位和电压矢量合成状态的实现方式。文献[31]提出了无位置传感器磁链自适应直接转矩控制,采用空间矢量脉宽调制技术,具有磁链脉动小、 d 轴电流小、电机在轻负荷或负载突然增加时的效率提高等优点,研究了基于宽速度滑模观测器(SMO)的无位置传感器控制,提高了系统的可靠性,可以在5%~100%的额定转速范围内运行,具有良好的跟踪能力、快速的动态特性和较强的鲁棒性。文献[32]提出了一种新的基于预测的鲁棒控制器,将液压制动系统与再生制动系统相结合,在此基础上,提出了一种分配力矩的控制策略,不仅可以很好地跟踪车轮滑移率,还可以消除影响驱动的液压脉动。

2016年,Zhai等^[33]研究一种利用电机驱动力矩和再生制动力矩分配控制的电子稳定控制算法,控制器应用PID控制、模糊PID控制等算法计算出力矩期望值来分配力矩,提高了车辆稳定性和操控性。文献[34]研究了在一个前轮转向失效的情况下,考虑只由一个独立驱动的前轮完成转向,设计了一种鲁棒的 H_∞ 输出反馈器,考虑了轮胎侧偏刚度的不确定性、车辆纵向速度的变化和外界的干扰,使车辆对不同的行驶条件具有较强的鲁棒性。

文献[35]研究了一种基于径向基函数神经

网络(RBFNN)的动态解耦方法,可以有效地提高系统的控制精度、响应速度和鲁棒性。燕山大学的张立鹏等^[36]通过对轮毂电机驱动电动汽车进行受力分析,揭示了其附加侧倾力矩的产生机理,并完成了横摆运动和侧倾运动控制策略的制订,基于模型预测控制和最优控制理论开发了整车横摆与侧倾联合控制器并实现了控制解耦,仿真结果表明,加入控制的车辆稳定性明显改善,横摆角速度和质心侧偏角明显降低,其中横摆角速度峰值降低了20%~30%,效果良好;同时,车身侧倾角峰值明显减小,侧倾稳定性得到大幅提升。Shao等^[37]针对悬架振动和车轮电机轴承磨损问题,提出一种多目标鲁棒性 H_∞ 方法,采用T-S模糊模型进行建模,将电机动力作为附加优化对象,减少了电机磨损,在碰撞和随机道路激励下,车辆有更好的运行性能。

3.3 轮毂电机热分析

电机热分析是电机设计时非常重要的环节,越来越不容忽视^[38-41]。为了驱动电动汽车,轮毂电机工作时会产生大量热量,经常会工作在高温高压环境下。钕铁硼永磁材料居里温度低,温度系数高,温度上限为120~150℃^[42],高温时其磁损失大^[43-44],而且绝缘材料老化加快,电机的寿命将减少。因此电机温度控制对于轮毂电机至关重要。常用的电机冷却方式主要有自然冷却、强迫风冷^[45-47]、循环水冷^[48-51]和油内冷^[52-53]等。

油内冷利用导热系数大、绝缘强度高、黏滞系数低的变压器油为冷却介质,将电机内部热量传递至机壳并散发出去,降低电机温度。

循环水冷以净化水为冷却介质。一种方式是在定子绕组中嵌入导水管,通过导水管内水的循环流动实现冷却电机绕组的目的,主要为轴向“Z”字型 and 周向螺旋型;另一种方式是在电机定子机壳中设计冷却水道,通过冷却水道内水的循环流动实现电机冷却的目的,但水道设计难度大,工艺复杂。

水的比热容比油要大,散热能力较强,但是水冷无法对电机内部进行散热,油冷则可以对电机内部散热。国内对水冷方式研究较多,油冷方式研究较少。

2014年,Lim等^[54]开发研究了一种喷油冷却系统,优化了冷却通道的形状,改善了线圈和定子

铁心的散热性能,在基速和连续额定驱动条件下,线圈温度为 125.1~138.1 °C,在最高转速条件下,温度范围为 134.6~137.8 °C。喷油冷却方法具有更好的散热性能和更均匀的内部温度分布。

2015 年,哈尔滨工业大学的梁培鑫等^[55]对高功率密度轮毂电机温度场建模问题进行研究,提出一种按损耗分布加载热源的方法,通过仿真验证,在高速时,这种方法比平均加载热源法更精确,分析轮毂电机高速运行情况下采用这种方法很有必要。

2015 年,Pyrhonen 等^[56]分析发现,PMSM 工作在极限转矩情况时,永磁体内可能存在磁滞损耗,而在电机正常工作点附近,仅需考虑永磁体涡流损耗,不必考虑永磁体磁滞损耗。Okamoto 等^[57]提出一种减小定子铁耗的方法,采用有较好导磁性能且损耗系数较小的非定型铁磁材料(AMM)取代硅钢片,在相同的工作条件下,铁耗减少了 38%。这种材料更适用于高速电机。

Rhebergen 等^[58]提出了一种定子槽内轴向冷却和高导热物质填充的冷却方式,在定子槽内用高分子材料混合物进行间隙填充,在槽口处用轴向液体冷却方式将绕组传出的热量带走。Schiefer 等^[59]提出一种新型的槽内水冷结构,利用槽内绕组剩余空间进行冷却,水道为轴向“Z”字型,截面为三角形,冷却效果优于传统结构冷却方式,但是对加工工艺和槽绝缘有较高的要求。Polikarpova 等^[60]提出了一种灌封材料和齿部插入铜棒的水冷方式,插入铜棒时,定子绕组温度降低了 20 K,插入铜棒且灌封材料时,定子绕组温度降低 25~35 K,灌封材料和铜棒的应用可以使永磁材料温度降低 40 K。这种冷却方案可以很容易地适用于其他封闭环境冷却的 PMSM。

2016 年,Karnavas 等^[61]对电动汽车轮毂电机的冷却系统和温度分析进行了研究,介绍了一种简单而有效的电动汽车车轮冷却系统,给出了详细结构(轮辋、壳体和轮胎)的热模型,定子轭部温度降低了 9~27 K,绕组温度降低了 4~12 K,气隙内的温度降低了 3~9 K,而磁体和转子轭的最大温降分别达到 5 K 和 4 K。韩国的 Lee 等^[62]研究了空心轴内永磁电机的冷却问题,优化了空心轴冷却通道,与空冷电机相比,线圈温度降低了 50%,定子温度降低了 42%。

4 结 语

轮毂电机具有结构紧凑、控制方便、传动效率高、转矩分配和转向灵活等优点,并且会增加整车布置和设计自由度,是新能源电动汽车一个重要的发展方向。

我国轮毂电机的发展道路还很漫长,对于电机本体的设计和优化还不成熟,只能小范围使用;控制系统的研发有一定的基础,产品能基本满足电动汽车的要求;但散热方式研究还不够深入,油冷方面的研究很少。国内轮毂电机的发展还不成熟,还需要开展国际合作,争取赶上先进水平。

由于车轮内部空间有限,给电机、驱动系统、散热系统等的布置增加了难度。轮毂电机接下来还要致力于以下几个方面的研究:(1)提高电机的转矩密度、功率密度,降低重量,减小体积;(2)运用智能控制,增加系统学习能力、自调整能力,优化转矩分配,提高系统的适应性和鲁棒性;(3)散热和振动还要不断研究,提高运行的安全性和可靠性。

随着电池技术、电机本体、电力电子等技术的发展和突破,轮毂电机必将在电动汽车领域得到更广泛的应用。

【参 考 文 献】

- [1] 李刚,宗长富.四轮独立驱动轮毂电机电动汽车研究综述[J].辽宁工业大学学报,2014,34(1): 47.
- [2] 李勇,徐兴,孙晓东,等.轮毂电机驱动技术研究概况及发展综述[J].电机与控制应用,2017,44(6): 1.
- [3] 褚文强,辜承林.国内外轮毂电机应用概况和发展趋势[J].微电机,2007,40(9): 77.
- [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,2015,29(7): 10.
- [5] 周汉秦.电动汽车用直驱式轮毂电机设计与优化[D].杭州:浙江大学,2018.
- [6] 杨宇.轮毂电机驱动电动汽车的电制动特性研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [7] KAYA Y, ISHITANI H, SAKURAI T, et al. IZA, a new concept, advanced electric vehicle developed by Tokyo Electric Power Company [C] // 25th ISATA Silver Jubilee International Symposium on Automotive Technology and Automation, Florence, 1992: 41.
- [8] MATSUGAURA S, KAWAKAMI K, SHIMIZU H.

- Evaluation of performances for the in-wheel drive system for the new concept electric vehicle "KAZ" [C] // The 19th International Electric Vehicle Symposium, Busan, 2002.
- [9] 周兰. 基于ANSOFT 电动汽车用永磁同步电机电磁设计及性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [10] 张斌. 电动汽车永磁同步驱动电机电磁热设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [11] 王凯, 孙海阳, 张露锋, 等. 永磁同步电机转子磁极优化技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7304.
- [12] LI Y, PEI Y, LIANG P, et al. Analysis of the rotor mechanical strength of interior permanent magnet synchronous in-wheel motor with high speed and large torque[C] // ITEC Asia-Pacific, 2014.
- [13] ZHAO W, LIPO T A, KWON B. Material-efficient permanent-magnet shape for torque pulsation minimization in SPM motors for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5779.
- [14] YU H, YU B, YU J, et al. A dual notched design of radial-flux permanent magnet motors with low cogging torque and rare earth material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8203104.
- [15] DAJAKU G, GERLING D. New methods for reducing the cogging torque ripples of PMSM [C] // 4th International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, 2014.
- [16] KIM K C. A novel method for minimization of cogging torque and torque ripple for interior permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 7019604.
- [17] 王晓远, 高鹏. 基于进化策略的轮毂电机永磁体结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 979.
- [18] RECHENBERG I. Evolutions strategic: optimierung techischer system nach prinzipiender biologischen evolution[M]. Stuttgart: Frommann-Holzboog Verlag, 1973: 36-54.
- [19] CHUNG S U, KIM J W, CHUN Y D, et al. Fractional slot concentrated winding PMSM with consequent pole rotor for a low-speed direct drive: reduction of rare earth permanent magnet[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(1): 103.
- [20] 黄苏融, 张志祥, 张琪, 等. 考虑电工钢应力-磁特性的电动汽车电磁性能仿真计算[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 83.
- [21] REN W, XU Q, LI Q, et al. Reduction of cogging torque and torque ripple in interior PM machines with asymmetrical V-type rotor design [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 8104105.
- [22] 张羽, 邓兆祥, 张河山, 等. 量子遗传算法在永磁同步轮毂电机优化设计中的应用[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(8): 1.
- [23] GE X, ZHU Z Q, KEMP G, et al. Optimal step-skew methods for cogging torque reduction accounting for three-dimensional effect of interior permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 222.
- [24] 刘旭东. 基于预测控制的电动汽车用永磁同步电机控制策略与关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [25] 魏冰. 电动汽车用永磁同步电机控制系统的研究与实现[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [26] CHEN Y, LI X D, WIET C, et al. Energy management and driving strategy for in-wheel motor electric ground vehicles with terrain profile preview [J]. IEEE Transaction on Industrial Informatics, 2014, 10(3): 1938.
- [27] 彭思伦. 轮毂电机转矩优化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [28] ZHAO H, GAO B Z, REN B T, et al. Integrated control of in-wheel motor electric vehicles using a triple-step nonlinear method [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(2): 519.
- [29] 樊英, 张向阳, 魏梦萨, 等. 开绕组永磁复合轮毂电机驱动系统容错控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 98.
- [30] YIN D, HU J S. Active approach to electronic stability control for front-wheel drive in-wheel motor electric vehicles [J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(6): 979.
- [31] FAN Y, ZHANG L, CHENG M, et al. Sensorless SVPWM-FADTC of a new flux-modulated permanent-magnet wheel motor based on a wide-speed sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3143.
- [32] WANG B, HUANG X Y, WANG J M, et al. A robust wheel slip ratio control design combining hydraulic and regenerative braking systems for in-wheel-motors-driven electric vehicles [J]. Journal of

- the Franklin Institute, 2015, 352(2): 577.
- [33] ZHAI L, SUN T M, WANG J. Electronic stability control based on motor driving and breaking torque distribution for a four in-wheel motor drive electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4726.
- [34] WANG R, JING H, HU C, et al. Robust H_∞ output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering [J]. Neutocomputing, 2016, 173(3): 676.
- [35] 张立鹏, 李亮, 祁炳楠. 轮毂电机驱动电动汽车侧倾稳定性解耦控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 94.
- [36] SHAO X X, NAGHDY F, DU H P. Reliable fuzzy H_∞ control for active suspension of in-wheel motor driven electric vehicles with dynamic damping [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87(A): 365.
- [37] 王云鹏. 高转矩密度集中绕组永磁电机槽内油冷系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [38] FODOREAN D, MIRAOUI A. Permanent magnets thermal operation limits in a hybrid excited synchronous machine used on wide speed applications [C] // 2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008: 21.
- [39] TONG W M, WU S N, AN Z L, et al. Cooling system design and thermal analysis of multibrid permanent magnet wind generator [C] // 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010: 3499.
- [40] 张勇. 永磁同步轮毂电机损耗与磁热耦合[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [41] 梁培鑫. 永磁同步轮毂电机发热及散热问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [42] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [43] 张炳义, 王三尧, 冯桂宏. 钕铁硼永磁电机永磁体涡流发热退磁研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(2): 126.
- [44] 胡田, 唐任远, 李岩, 等. 永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 122.
- [45] YANG K, FENG Y J. Design of novel spiral magnetic poles and axial-cooling structure of outer-rotor PM torque motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 838.
- [46] DONG H L, LEE M Y, LEE H S, et al. Performance evaluation of an in-wheel motor cooling system in an electric vehicle/hybrid electric vehicle [J]. Energies, 2014, 7(2): 961.
- [47] 丁杰, 张平. 永磁同步电机的冷却结构优化设计及温度场仿真[J]. 微特电机, 2016, 44(6): 31.
- [48] 佟文明, 程学斌. 高速水冷永磁电机冷却系统分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(3): 16.
- [49] 崔剌楷, 程文杰, 肖玲, 等. 10 kW 超高速永磁电机三维瞬态温度场计算[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 90.
- [50] 胡萌, 李海奇, 李旭光, 等. 电动车用水套冷却永磁电机损耗及温度[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(1): 27.
- [51] 王晓远, 杜静娟. 应用 CFD 流固耦合热分析车用高功率密度电机的水冷系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 30.
- [52] 李东和. 车用油冷电机温度场分析[J]. 微特电机, 2016, 44(7): 37.
- [53] DAVIN T, PELLE J, HARMAND S, et al. Experimental study of oil cooling systems for electric motors [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75(22): 1.
- [54] LIM D H, KIM S C. Thermal performance of oil spray cooling system for in-wheel motor in electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 63(2): 577.
- [55] 梁培鑫, 裴宇龙, 甘磊, 等. 高功率密度轮毂电机温度场建模研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 170.
- [56] PYRHONEN J, RUOHO S, NERG J, et al. Hysteresis losses in sintered NdFeB permanent magnet in rotating electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 857.
- [57] OKAMOTO S, DENIS N, FUJISAKI K. Core loss reduction of an interior permanent magnet synchronous motor using amorphous stator core [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015: 208.
- [58] RHEBERGEN C, BILGIN B, EMADI A. Enhancement of electric motor thermal management through axial cooling methods: a materials approach [C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 5682.

(下转第 113 页)

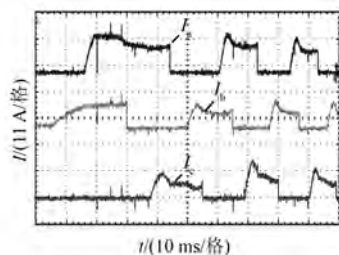


图9 自启动阶段三相电流

线性跟踪,且实现了数字地与功率地之间的隔离,提高了整个系统的稳定性。

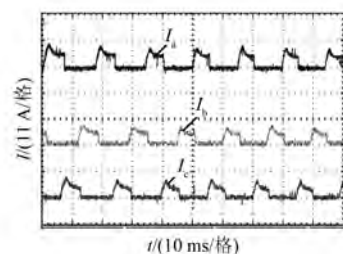


图10 正常运行阶段电流

4 结 语

本文通过采用高速光耦实现了控制信号与驱动信号的隔离,利用线性光耦实现了康铜丝电流采样信号以及母线电压的电阻分压信号与控制器AD采样信号的隔离。通过该方案的实施,在基本不增加系统体积成本的条件下,解决了传统低压电动车SRM驱动系统中控制地和功率地不隔离的问题,进一步提升了低压电动车SRM驱动系统的可靠性。

【参考文献】

- [1] BOSTANCI E, MOALLEM M, PARSAPOUR A, et al. Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: a comparative study [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 58.
- [2] 张明灏. 开关磁阻电机控制器电流采样及保护设计 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [3] 钟锐, 徐宇拓, 陆生礼. 基于 Cortex M3 处理器的开关磁阻电机控制器设计 [J]. 电子技术应用, 2011, 37(3): 32.
- [4] 朱曰莹, 赵桂范, 杨娜. 电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 88.
- [5] 黄为龙. 电动车开关磁阻电机控制器研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [6] 周聪, 刘闯, 王凯, 等. 用于开关磁阻电机驱动系统的新型单电阻电流采样技术 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 55.
- [7] 张超, 全力, 朱孝勇, 等. 基于 DSP+CPLD 的车用开关磁阻电机驱动控制系统的设计 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40(1): 13.
- [8] 谈宏兴. 电动汽车用开关磁阻电机控制系统的设计与研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [9] HU Y, GAN C, CAO W, et al. Split converter-fed SRM drive for flexible charging in EV/HEV applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6085.
- [10] GAN C, WU J, HU Y, et al. New integrated multilevel converter for switched reluctance motor drives in plug-in hybrid electric vehicles with flexible energy conversion [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3754.

收稿日期: 2018-09-17

(上接第 108 页)

- [59] SCHIEFER M, DOPPELBAUER M. Indirect slot cooling for high-power-density machines with concentrated winding [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015: 1820.
- [60] POLIKARPOVA M, PONOMAREV P, LINDH P, et al. Hybrid cooling method of axial-flux permanent-magnet machines for vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7382.
- [61] KARNAVAS Y L, CHASIOTIS I D, PEPONAKIS E L. Cooling system design and thermal analysis of an electric vehicle's in-wheel PMSM [C] // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016: 1439.
- [62] LEE K H, CHA H R, KIM Y B. Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 348.

收稿日期: 2018-08-22