

轮毂电机产业化难点简析

杨建川

(无锡威孚电驱科技有限公司, 江苏 无锡 214028)

摘要: 轮毂电机的显著优势及特点是将动力、传动和制动系统高度集成于轮毂内部, 可使搭载车辆节省离合器、变速器、传动轴、差速器、分动器等驱动部件, 从而降低质量、提高效率、简化底盘结构、提升车内可用空间。但轮毂电机的产业化之路, 仍有诸多瓶颈尚需解决。结合轮毂电机相关技术、成本、制造、市场等难点简要分析, 探讨了轮毂电机产业化发展思路。

关键词: 轮毂电机; 簧下质量; 制动系统; 密封; 成本; 制造; 市场化

中图分类号: TM 305 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)05-0090-04

doi: 10.12177/emca.2020.016

Brief Analysis on the Difficulties of In-Wheel Motor Industrialization

YANG Jianchuan

(Wuxi Weifu Electric-Drive Technology Co., Ltd., Wuxi 214028, China)

Abstract: In-wheel motor has the remarkable advantage and characteristic of highly integrating the powertrain, transmission and brake system, which can save the clutch, gearbox, transmission shaft, differential, transfer case, etc., so as to reduce weight, improve efficiency, simplify chassis structure, and increase vehicle interior available space. However, there are still many bottlenecks to be solved in the way of in-wheel motor industrialization. Combined with the brief analysis of the related technical, cost, manufacturing, marketing and other difficulties of in-wheel motor, the development of the in-wheel motor industrialization is searched and discussed.

Key words: in-wheel motor; unsprung mass; brake system; sealing; cost; manufacturing; marketization

0 引言

中汽协数据显示, 2018 年和 2019 年新能源汽车销量连续两年突破 120 万辆, 同时国际整车巨头(丰田、大众、特斯拉等)正在加快产品线电动化转型及在中国等地建厂布局, 为新能源产业链高速发展提供了巨大机遇。

当前新能源驱动电机的量产配套种类及数量, 仍以中央电机为主。虽然轮毂电机可将动力、传动、制动系统高度集成, 减少驱动传动部件数量、降低车辆质量、提高车辆效率并提升车内可用空间, 但目前轮毂电机技术仍处于工程样品、样车调试验证阶段。

世界上最接近于轮毂电机批量生产的公司, 如 Protean、Elaphe、e-Traction 等^[1], 均选择有国内汽车零部件行业的产业化合作伙伴。轮毂电机及轮边电机系统, 亦是《中国制造 2025》重点发展驱动电机技术路线目标之一^[2], 故急需解决当前轮毂电机产业化瓶颈。

通过产业合作协议, Protean 与无锡威孚高科技集团股份有限公司的合资公司无锡威孚电驱科技有限公司将负责 PD18 (Protean Drive 18 inches) 轮毂电机在中国市场的产业化推广。本文简要分析了 PD18 轮毂电机在技术、成本、制造、市场等领域面临的产业化难点, 探讨了轮毂电机产业化发展思路。

收稿日期: 2020-02-14; 收到修改稿日期: 2020-03-24

作者简介: 杨建川(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源电机产品工程。

1 分析背景

PD18 永磁同步轮毂电机的基本参数如表 1 所示。

表 1 PD18 永磁同步轮毂电机基本参数	
参数名称	参数或范围
1 000 r/min 峰值功率	80 kW@ DC 400 V
1 000 r/min 连续功率	60 kW@ DC 400 V
400 r/min 峰值扭矩	1 250 N·m@ DC 400 V
400 r/min 连续扭矩	625 N·m
电机+电控质量/kg	36
最高转速/(r·min ⁻¹)	直驱 1 600
供电电压/V	DC 200~400
液冷入口温度/全性能/℃	-20~50
环境温度/全性能/℃	-40~90
防护等级	IP6K9K

1.1 PD18 轮毂电机研发里程

PD18 轮毂电机已完成四代样品迭代开发 (Hi-Pa、LV、MHV、RAM), 并已开始第五代电机 (BCR) 研发, 分别实现目标: 技术可行性验证、刹车及电控系统集成、性能验证及客户耐久性、性能提升及型式认证、持续本地化等降低成本以及可制造可装配性 (DFMA) 改进, 研发里程如图 1 所示。

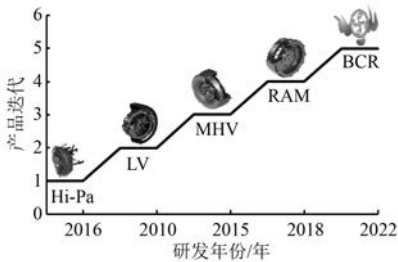


图 1 PD18 轮毂电机研发里程

1.2 PD18 轮毂电机开发流程

PD18 轮毂电机基本设计及测试过程包含: 首先, 分析产品设计相关需求, 如功能安全概念 (TSC)、产品要求规范 (PRS)、法规标准及客户指导要求 (LSG), 对应制订产品或项目集成测试计划 (IITP); 其次, 分解轮毂电机系统要求规范 (SRS)、制动系统要求 (BRS) 等规范, 对应制订系统集成测试计划 (SITP); 再次, 将系统要求规范 (SRS), 分解为机械设计规范 (MDS)、硬件设计规范 (HDS)、软件设计规范 (SDS) 文件, 其中 BRS

可作为 MDS 文件的输入之一, 并对应制订机械、硬件、软件的部件或模块的测试计划 (XTP), 也可把 XTP 及 SITP, 放进广义的 IITP 之中; 此外, 根据 MDS、HDS、SDS、BRS 等详细设计, 将生成对应的设计失效模式及后果分析文件 (DFMEA), 部分重要点将被识别反馈到 PRS、LSG 之中。PD18 轮毂电机设计测试流程如图 2 所示。

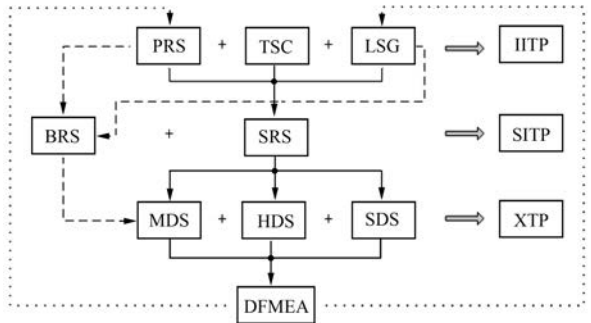


图 2 PD18 轮毂电机设计测试流程

2 PD18 轮毂电机产业化技术难点

虽然 PD18 各代轮毂电机具有相对完善的开发流程保障, 但因轮毂电机轮端的实际应用环境 (空间有限、振动冲击、泥沙涉水、冷却散热等), 远比中央电机复杂, 故相应的开发难度将倍增, 甚至会遗留一些技术问题短期难以解决, 或使应用场景受限。

2.1 簧下质量对车辆性能的影响

轮毂电机造成的非簧载质量增大, 对车辆乘坐舒适性、操控稳定性、安全性等存在影响^[3]。得益于 PD18 轮毂电机的高功率密度、轻量化设计要求, 簧下质量增加有限。通过底盘悬架重新调校, 受簧下质量增加而下降的车辆性能可以恢复, 特别是对配备多连杆等独立悬架的车辆。但轮毂电机外部接口的安装空间, 可能会受到整车底盘部件尺寸限制。基于大众高尔夫 GTE 后驱车辆, 在 3 种状态下的由第三方专业机构主客观、同等标准评价如图 3 所示。

2.2 量产制动系统的配套开发

图 4 所示 PD18 轮毂电机制动系统, 包括: 圆环形的制动盘、合适材料的制动片、能对制动盘提供足够夹紧力的制动卡钳、与车辆悬架连接的支撑托架等制动组件。制动盘固定在电机转子内端

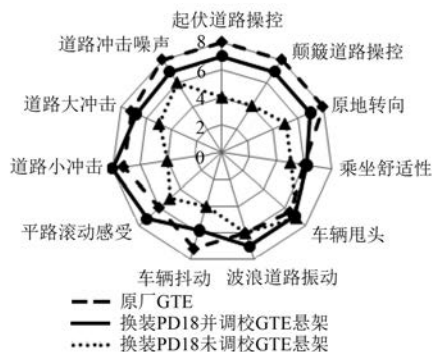


图3 PD18 轮毂电机换装车性能对比

面外缘,则制动传递路径的载荷校核、制动摩擦磨损颗粒物及泥水沙石排出、制动热衰退、制动振动噪声控制及高低温/盐雾环境下应用可靠性等设计开发细节,均要求整车厂家结合搭载车辆的质量、轴荷、制动力分配、制动时间距离等,配套开发其可量产易维护的制动系统、重新标定 ABS 等安全系统。

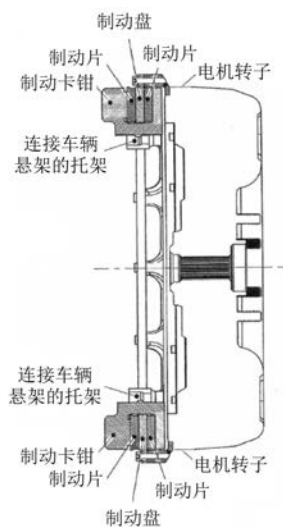


图4 PD18 轮毂电机双卡钳制动系统示意图

2.3 全生命周期下的密封性能保证

PD18 轮毂电机设计寿命长达 15 年或里程达 30 万公里,在第四代设计方案上(基本参数见表 1),主要采用两道密封来保证全生命周期下的密封性能要求,如图 5 所示。

安装于电机转子与定子之间的特殊材质 V 型圈进行动密封,合理的自适应结构可实现水和颗粒物的隔离,并适应运行温度变化及偏磨。针对线圈绕组等高压部件,通过优选多层复合绝缘

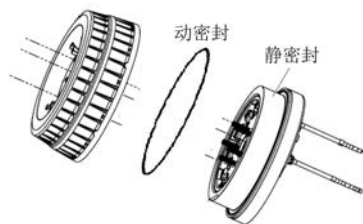


图5 PD18 第四代轮毂电机密封方式示意

材料精确灌封进行静密封。该密封结构已在某工程样车上完成超过 30 万公里确认,但针对不同车型或不同运行环境条件下的密封性能有待进一步验证。出于降低成本等目的,考虑采取电机定子壳体全密封改进等结构方案(轮端允许尺寸是关键),以减省密封部件或调整昂贵材料,且达到了更佳密封性能。

3 PD18 轮毂电机产业化成本难点

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,导致轮毂电机驱动技术的大规模商业化应用尚未实现^[4]。在车辆的前轮或后轮,轮毂电机成对搭载,甚至在四轮以上的更多车轴应用,且每个轮毂电机常规各采用一套独立的电控系统,故相同的功率输出条件下,若车辆动力系统选用轮毂电机驱动方案,价格成本将是中央电机驱动方案的数倍。PD18 轮毂电机主要成本分布如图 6 所示。

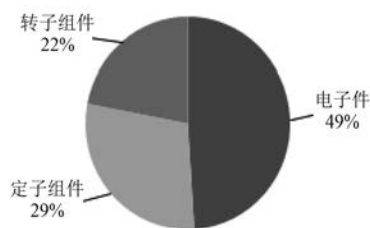


图6 PD18 轮毂电机主要成本分布

出于功能安全冗余等设计考虑,且在尚未形成规模化量产,重要的电子件(IGBT、芯片及元器件等)均需以样品价格进口,导致成本压力较高。

4 PD18 轮毂电机产业化制造难点

PD18 轮毂电机的装配制造主要有 3 方面的

工艺:转子组件分/组装、定子组件分/组装、定转子合体。因允许安装的车辆轮毂空间限制,PD18 轮毂电机及内置电控系统一体化设计的机电耦合程度非常高,3 方面制造工艺均与中央电机的核心工序不同,如永磁体选择前充磁或后充磁、铁心热套变形量控制、动平衡纠正配重方式、线圈组绕制及三相连接、定子灌封温度及温升、机电耦合处粘合或焊接处理、定转子合体后气隙保证等方面均需要重新摸索适合稳定生产的量产方式,前后道工序参数的相互影响,开发定制工装及智能设备。PD18 轮毂电机转子组件部分制造工序如图 7 所示。

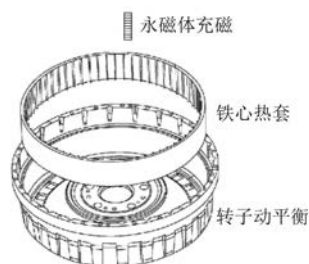


图 7 PD18 轮毂电机转子组件部分制造工序

5 PD18 轮毂电机产业化市场难点

轮毂电机产业化之路,必须要有上下游产业链的同步工程支持,各展所长解决技术及成本等难点。PD18 轮毂电机的专业零部件供应商,尚需在 3~5 年内持续配合样件开发及奠定稳定供货能力、打破国外知识产权垄断;整车厂家推动低地板型式等新一代汽车底盘动力学一体化控制系统研发^[5],将制动/驱动、转向主动悬架等功能集成于“主动轮”或“电动轮”,提升燃料电池及电动汽车等新能源车在可用车内空间、续航里程、智能驾驶及操控安全等方面的商业价值;完善普通终端客户用车体验及产品售服体系,对产业化推广进度影响巨大。PD18 轮毂电机在新底盘平台搭载示意图如图 8 所示。



图 8 PD18 轮毂电机在新底盘平台搭载示意图

6 结 语

轮毂电机产品所具有的系统高度集成化特点,符合氢燃料和智能化以及新型通用化电动汽车平台发展的应用需求。簧下质量、制动系统、密封性能等技术攻克,电子件冗余精简及国产降低成本方案,制造工艺及核心装备开发,产业上下游同步工程等,仍是轮毂电机产业化进程需要持续解决难点。加深轮毂电机产业链的国际合作,实现相关技术、工艺、成本等优势融合互补,可以提升轮毂电机产业化的市场前景。国家制造战略政策、分布式驱动及智能汽车等技术推广,将是促进轮毂电机产业化发展的契机。

【参考文献】

- [1] 孔垂毅,代颖,罗建.电动汽车轮毂电机技术的发展现状与发展趋势[J].电机与控制应用,2019,46(2): 101.
- [2] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会,中国汽车工程学会.节能与新能源汽车技术路线图[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [3] ANDERSON M, HARTY D. Unsprung mass with in-wheel motors-myths and realities[C]//International Symposium on Advanced Vehicle (AVEC), 2010: 261.
- [4] 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.
- [5] 李以农,杨阳,孙伟,等.电动汽车底盘一体化控制技术的发展趋势与展望[J].世界科技研究与发展,2016,38(3): 481.