

新能源车辆轮毂电机轴承单元的研究进展

河南科技大学 邱明 杨传猛 董艳方 李军星

轮毂电机驱动车辆因结构简单、传动效率高、转向灵活、操控简便等优势被工业界和学术界普遍关注。轮毂电机轴承单元位于悬架下，直接驱动车轮，工况条件恶劣，对结构、重量、扭矩、温升等有苛刻要求。掌握先进轮毂电机轴承单元设计理论与方法，突破其设计关键技术，是我国在新能源汽车发展浪潮中占据主动的关键所在。在轮毂电机近二十年发展中，高密度驱动、高输出扭矩、恒温稳定运行等苛刻要求始终制约着其发展应用，特别是电机和轴承单元高度集成于轮内，承受着高温、高转动惯量、内外部复杂动载的多重作用，其服役性能的不足直接影响着轮毂电机运行稳定性及整体驱动系统的服役特性。

一、国内外研究现状

目前，国外企业已初步掌握了轮毂电机各项先进技术，在轮毂轴承单元低摩擦技术、轻量化设计、润滑增效技术等方面开展了大量研究工作，而国内在基础理论和关键技术方面均与国外存在较大差距。

1. 在轮毂电机整机研究方面，国外已有如 Protean Electric、Elaphe、e-Traction 等公司针对轮毂电机开展深入研究和推广应用，已开发出相应产品并实现初步应用。近年来，我国各汽车厂商纷纷与各大研究机构合作探索轮毂电机技术，同时也采用外延并购的策略引进国外先进技术，如恒大公司、亚太机电、湖北泰特机电等企业与国外轮毂电机企业合作，面向国内车企进行相关轮毂电机的研发与推广应用。但国际上至今未有大批量轮毂电机车辆应用实例，其重要原因就在于轮内电机和轴承单元融合性不足、轮毂电机散

热性能差、轴承单元服役寿命不足和可靠性欠缺，这些问题直接影响着轮毂电机系统运行稳定性和整车性能可靠性。国外相关研究表明，有 40%到 50%的电机故障是与轴承失效有关，其中包括由于轮毂电机温度过高引发的轴承单元润滑失效。轮毂轴承单元失效是所有轮毂电机机械失效模式中发生概率最大、严重程度最高的失效类型，轮毂电机独特的安装方式、电动汽车多变的行驶工况、车辆运行过程中复杂的路况都极易引起轴承单元发生局部磨损、疲劳失效等故障。国外如 Protean、Elaphe 等公司在研发轮毂电机过程中，多是以匹配的方式选取现有第三代轮毂轴承单元产品，尚未开展对轮毂轴承单元的针对性研究，无法克服轴承温度高、寿命不足、可靠性差等问题。

2. 在轮毂轴承单元低摩擦技术方面，国外各大轴承企业均致力于降低轮毂轴承单元摩擦力矩的研究，以提高车辆的传动效率。日本 JTEKT 公司通过深入研究影响轮毂轴承摩擦力矩的主要因素，针对性地采用新型低粘度润滑脂和密封装置等，开发了一种基于 HUBLFT 技术的低摩擦力矩轮毂轴承单元，该新型轮毂轴承相比传统三代轮毂轴承旋转摩擦力矩可降低 50%。然而，我国针对轮毂轴承低摩擦技术方面的研究多集中于理论层面的研究，轮毂轴承企业目前主要处于逆向吸收学习国外现有技术的阶段，尚未形成独立自主的低摩擦力矩、高可靠性轮毂轴承设计技术。

3. 在轮毂轴承单元轻量化技术方面，难以降低的簧下质量是影响轮毂电机服役性能的关键因素之一，因而对轮毂轴承单元的轻量化设计提出了苛刻要求。目前，国外企业已形成较为完备的轮毂轴承单元 CAE 轻量化分析技术，正朝着多目标优化设计方向发展。JTEKT 公司在维持或提高轴承刚度、轴承寿命、疲劳强度的条件下，对轮毂轴承法兰轴及外圈法兰轮廓、螺栓位置等进行多目标优化，使整体重量下降 9%至 10%。我国轴承企业目前已初步具备通过 CAE 分析实现对轮毂轴承的优化设计技术，但尚未形成系统的设计理论

体系，仍处于对现有轮毂轴承产品改进阶段。

4. 在轮毂轴承单元润滑增效技术方面，为提升轮毂轴承润滑性能，国内外科研机构及大型轴承公司在润滑设计、润滑优化、润滑介质制备、评价体系建立等方面开展大量研究工作。NTN 和 SKF 等公司分别推出了低粘度润滑脂，随后各大轴承公司相继推出了系列化的低粘度轮毂轴承润滑脂。目前国外主流低粘度轮毂轴承润滑脂的减摩效果在 9%至 10%之间。国内近年才开始关注轮毂轴承润滑脂方面的研究，对润滑脂粘度、轮毂轴承表面几何-力学特参数以及轮毂轴承润滑性能的内在联系缺乏系统研究。

综上所述，目前国内外尚未开展轮毂电机轴承单元设计方法的系统性研究，国内缺乏能独立研制高性能轮毂电机的企业或科研机构。为弥补我国轮毂电机技术与国外的差距，实现轮毂电机在新能源汽车行业的全面应用，先进轮毂电机轴承单元设计理论与技术亟待突破，轮毂电机专用轴承单元设计与研发势在必行。

二、轮毂电机轴承单元的研究进展

河南科技大学联合华中科技大学、洛阳轴承研究所有限公司、北京理工大学、内蒙古一机等单位围绕先进轮毂电机轴承单元设计理论与方法开展了基础性理论研究。

1. 针对力-热传递解析问题，提出了面向轮毂电机驱动特种车辆的“环境-轮毂单元-悬挂-车体-隔振器-被隔振体”系统一体建模的理念，以在轮毂电机驱动单元设计和分析中充分考虑到系统动态特性，建立了轮毂电机驱动的整车系统动力学模型，分析了系统固有振动特性和多源力产生及其传递特性。

2. 针对轮毂电机的温升与冷却问题，建立了包含轮毂电机、外部驱动电路、磁场、温度场的机-电-磁-热耦合模型，将电机各部分损耗和制动系统产

生的热源耦合到轮毂电机一体结构各部件中进行瞬态温度场研究，以揭示轮毂电机复杂动态行为与热特性的交互作用机理。

3. 针对润滑与增效问题，基于多体动力学理论描述轴承内各元件的运动，并充分考虑各元件间相互作用，建立了考虑动载的多自由度轴承动力学分析模型，以及考虑动载的滚动体与滚道瞬态润滑分析模型，开展轴承动力学行为研究，并开展了润滑脂膜厚度测量和模拟轴承 100%打滑条件及减摩性研究。

4. 针对轮毂电机与轴承一体化结构问题，开展了轮毂电机轴承单元应用车辆参数确定及轴承单元额定动载荷计算，建立了轮毂电机轴承单元融合结构模型，提出了轮毂电机轴承单元设计方案，开展了轮毂轴承单元轻量化设计和高可靠性设计研究，形成了轮毂轴承单元设计图纸。

5. 针对试验验证平台建设，开展了轴承摩擦试验台设计，以确定摩擦试验台加载和摩擦力测量方案；提出了基于光纤光栅的轴承载荷、温度及振动等参数的在线测试方法，以实现轴承状态监测网络初步设计；提出了轮毂电机轴承单元一体化结构系统综合性能测试平台中的轮毂电机轴承单元模拟工况综合测试系统设计框架。

三、结束语

通过系统性的研究，期望形成涵盖轮毂电机轴承单元结构融合设计技术、轴承单元长寿命设计技术、强制冷却技术、可靠性设计技术等相关的系列成果，致力于提升我国轮毂电机轴承单元服役性能和设计水平，支撑我国新能源汽车行业的快速发展。