

# 新能源汽车电驱动系统关键技术及其发展趋势分析

邓建明 龚循飞 于勤 樊华春 罗锋

(江西五十铃汽车有限公司,南昌 330108)

【欢迎引用】邓建明,龚循飞,于勤,等.新能源汽车电驱动系统关键技术及其发展趋势分析[J].汽车文摘,2025(2):18-22.

【Cite this paper】DENG J M, GONG X F, YU Q, et al. Analysis of Key Technologies and Development Trends in Electric Propulsion System for New Energy Vehicle[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(2): 18-22.

【摘要】电动汽车的发展对于解决能源危机和环境问题至关重要。为了分析电驱动系统的关键技术并探索其创新方向,推动新能源汽车发展,基于《节能与新能源汽车技术路线图2.0》,概述了电驱动系统中的驱动电机和驱动电机控制器的关键技术及其性能指标。通过分析电驱系统发展现状及存在问题,预测其未来发展趋势,提出了包括电机设计、控制算法、散热技术、功能安全在内的创新方向,以期为我国新能源汽车电驱技术的进一步发展提供参考。

关键词:新能源汽车;电驱动系统;电机控制器;永磁同步电机;控制算法;功能安全;节能

中图分类号:U469.7 文献标志码:A DOI:10.19822/j.cnki.1671-6329.20230290

## Analysis of Key Technologies and Development Trends in Electric Propulsion System for New Energy Vehicle

Deng Jianming, Gong Xunfei, Yu Qin, Fan Huachun, Luo Feng

(Jiangxi Isuzu Motors Co., Ltd., Jiangxi 330108)

【Abstract】The development of electric vehicles is crucial for addressing the energy crisis and environmental challenges. To analyze the key technologies and propose innovative directions for advancing new energy vehicles, this paper based on the “Energy-Saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap 2.0,” provides an overview of the critical technologies and performance metrics of traction motors and motor controllers within electric propulsion systems. By examining the current status and challenges of these systems, the paper forecasts future development trends and proposes innovative directions in motor design, control algorithms, thermal management, and functional safety. These insights aim to contribute to the further development of electric propulsion technologies in China’s new energy vehicle sector.

**Key words:** Electric vehicle, Electric drive system, Motor controller, Permanent magnet synchronous motor, Control algorithm, Functional safety, Energy saving

## 0 引言

节能与新能源汽车是应对能源危机和环境污染的重要措施之一,也是我国汽车产业转型升级的重要方向<sup>[1]</sup>。电驱动系统作为新能源汽车的动力核心,不仅决定了整车的性能与能源利用效率,还直接影响车辆的续航能力、动力响应和整体驾驶体验,是实现节能减排、降低碳排放的关键技术,其技术水平和可靠性在很大程度上决定了我国新能源汽车产业在全球市场中的竞争力和创新能力<sup>[2]</sup>。近年来,国内外学者在电驱动系统的研究方面取得了显著进展<sup>[3-4]</sup>。关于驱动电机的研究热点主要集中在高效散热、高频轴承

电流抑制、高精度位置传感器、少(无)重稀土永磁体以及永磁体辅助多层磁阻电机技术的开发方面。在控制器方面,研究重点主要包括低感高密度碳化硅(Silicon Carbide Devices, SiC)模块、新型控制算法、高度集成封装(Highly Integrated Packaging, HIP)、双面冷却技术、主动降噪控制策略以及功率半导体器件和驱动控制器封装技术<sup>[5]</sup>。

本文基于《节能与新能源汽车技术路线图2.0》,系统地分析电驱动系统的关键技术及其创新方向,重点探讨驱动电机和驱动电机控制器在提高新能源汽车性能和竞争力方面的作用,并提出我国在电驱动系统效率、功率密度、可靠性和安全性方面的改进策略和建议。

## 1 电驱系统关键技术创新方向

基于《节能与新能源汽车技术路线图2.0》的指导与长期研究,电驱动系统技术的创新方向主要集中在驱动电机和驱动控制器2个关键部分。在驱动控制器方面,创新方向包括低感高密度SiC模块技术、提升效率的新型控制算法、高集成度封装技术、高效双面冷却技术、主动降噪控制策略,以及符合ISO 26262功能安全的设计。在驱动电机方面,主要创新方向包括高效散热技术、高频轴承电流抑制技术、高精度位置传感器技术,以及少(无)重稀土永磁体技术。除此之外,永磁体辅助多层磁阻电机技术和永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)技术也是未来发展的重要方向。这些技术创新旨在全面提升电驱动系统的性能、效率与安全性,满足未来新能源汽车更高的要求,如图1所示。

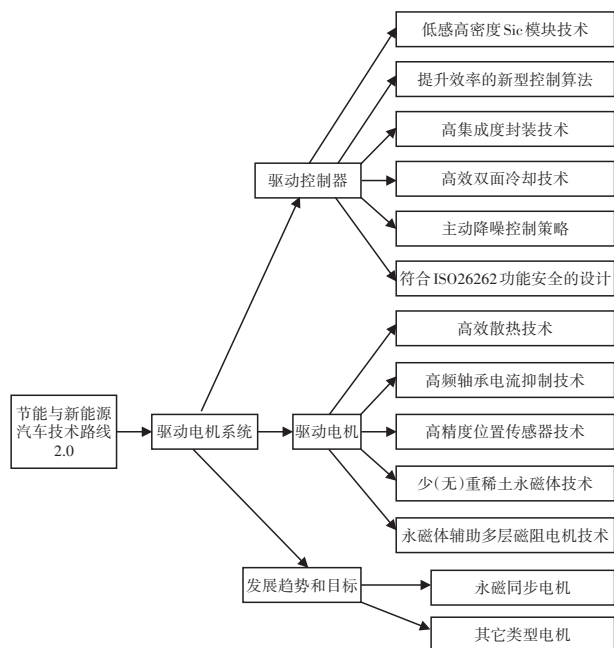


图1 电驱动系统的关键技术及创新方向

## 2 驱动电机关键技术

### 2.1 驱动电机关键技术发展概述

驱动电机是新能源汽车的关键执行组件,对汽车续驶能力、加速性能及噪声强度产生直接影响。驱动电机主要包括直流有刷电机、交流异步电机和永磁同步电机3种类型。直流有刷电机在20世纪90年代初期得到广泛应用,但其效率低且使用寿命短,逐渐被交流异步电机和PMSM取代。交流异步电机可靠性高,但其功率密度较低。PMSM具有效率高特点,将成为未来新能源汽车动力系统的主流选择。然而,

PMSM成本高且对稀土材料依赖性较强,因此,在其实现广泛应用前,需要克服一系列技术难题。

表1对5项驱动电机关键技术特点、优势以及其面临的技术难题进行了对比,包括高效散热技术、高频轴承电流抑制技术、高精度位置传感器技术、少(无)重稀土永磁材料和永磁体辅助多层磁阻电机技术。

表1 驱动电机关键技术对比

驱动电机的关键技术	技术特点	技术优势	技术难题
高效散热技术	采用高导热材料、优化散热结构以及增加散热面积的方式提高电机散热性能	抑制电机温升、提高电机效率、延长电机寿命	控制散热成本、解决散热与结构之间的冲突
高频轴承电流抑制技术	采用绝缘轴承、陶瓷轴承以及轴承保护器的方式抑制由电机高频开关引起的轴承电流	保护轴承免受电蚀、延长轴承寿命、降低噪声	提高轴承可靠性、降低轴承成本
高精度位置传感器技术	采用霍尔传感器、光学编码器以及磁阻传感器的方式检测电机转子的位置和速度	提高电机控制精度、降低转矩脉动、提高效率	传感器与电机之间的匹配问题、提高传感器抗干扰能力
少(无)重稀土永磁体技术	采用在钕铁硼永磁体中掺杂、替代部分重稀土元素或采用铁氮化物永磁体的方式减少或消除重稀土元素的使用	降低永磁体成本、降低对稀土资源的依赖性	保持永磁体的高性能、提高永磁体的稳定性和可靠性
永磁体辅助多层磁阻电机技术	采用永磁体和多层绕组结合的方式实现磁阻效应和永磁效应的叠加	提高电机效率、降低永磁体用量、提高故障容错能力	增加电机设计难度、增加控制复杂度

### 2.2 驱动电机关键性能指标

驱动电机的关键指标直接影响电驱动系统的整体性能、能耗和舒适性,是评估和优化驱动电机设计的核心参数。理解关键指标的作用和意义,有助于深入理解电驱动系统在新能源汽车中的地位与价值。驱动电机的关键性能指标主要包括功率密度、功率、转矩密度以及噪声。

(1)功率密度。功率密度是指电机的输出功率与电机质量的比值,反映了电机的轻量化程度。新能源汽车搭载高功率密度电机可以减轻其质量,提高电动汽车的续驶里程。相关数据表明,2023年全球电动汽车驱动电机的平均功率密度约为3.2~3.3 kW/kg,预计到2025年将达到4 kW/kg<sup>[6]</sup>,预计复合年增长率约为11.8%。提高电机的功率密度的技术路径主要包括采用高性能永磁体、优化电机结构以及提高电机散热效果。

(2)效率。效率是指电机的输出功率与输入功率的比值,反映了电机的能量转换效率。高效率的电机可以有效降低能量损耗,提高能量利用率,因此,新能源汽车对电机的效率具有较高要求。提高电机效率的技术路径主要包括采用高效率控制算法、降低电机的铜损和铁损以及抑制电机的轴承电流。

(3)转矩密度。转矩密度是指电机输出转矩与电机体积的比值,反映了电机的动力性能。新能源汽车应具有较高的转矩密度,以提高电机的输出转矩,提高加速性能。相关数据表明,2023年全球新能源汽车驱动电机的平均转矩密度约为 $5.0\text{ N}\cdot\text{m/L}$ ,预计到2025年将达到 $6.2\text{ N}\cdot\text{m/L}$ <sup>[7]</sup>,预计复合年增长率约为11.36%。提高电机转矩密度的技术路径主要包括采用高性能永磁体、优化电机的磁路设计以及提高电机的电流密度。

(4)噪声。噪声是指电机在运行过程中产生的声压级,反映了电机的噪声水平。新能源汽车对电机的噪声要求较为严格,旨在减轻电机噪声对驾驶员及乘客的干扰,提高新能源汽车舒适性。降低电机噪声的技术路径主要包括低噪声控制策略、降低电机的转矩波动以及减少电机的机械振动。

### 3 驱动电机控制器关键技术

#### 3.1 驱动电机控制器关键技术发展概述

驱动电机控制器是电驱动系统的核心控制单元,

负责根据驾驶员的意图和车辆的工况,控制驱动电机的转速、转矩和功率输出。驱动电机控制器的性能和效率直接影响新能源汽车的动力性能和能耗水平。为了提高驱动电机控制器的性能和效率,一些新型技术得以研究发展,如SiC模块技术、提升效率的新型控制算法、高集成度封装技术<sup>[8]</sup>、高效双面冷却技术、主动降噪控制策略以及符合ISO 26262<sup>[9]</sup>的功能安全技术,表2种列出了驱动电机控制器关键技术分析。

#### 3.2 驱动电机控制器关键指标

驱动电机控制器关键指标对电驱动系统的性能、耐久性和安全性具有重要作用,明确关键指标及其作用和意义,有助于理解电机控制器在推动新能源汽车技术进步中的重要性。驱动电机控制器的关键指标主要包括功率密度、效率、可靠性和安全性。

(1)功率密度。功率密度是指电机控制器输出功率与电机控制器体积的比值,反映了电机控制器的微型化程度。新能源汽车对电机控制器的功率密度要求较高,较高功率密度可以降低电机控制器的体积,提高新能源汽车的空间利用率。提高电机控制器功率密度的技术路径主要包括采用高性能SiC器件、优化电机控制器的拓扑结构以及提高电机控制器的散热效果。

(2)效率。效率是指电机控制器的输出功率与输入功率的比值,反映了电机控制器的能量转换效率。新能源汽车对电机控制器的效率要求较高,较高能量

表2 各种驱动电机控制器关键技术简介

驱动电机控制器关键技术	技术特点	技术优势	技术挑战
低感高密度SiC模块技术	采用SiC金属氧化物半导体场效应管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)和铜金属基板的功率模块,降低寄生电感和体积	提高效率、降低损耗、提高电压利用率、提高载流密度和寿命	降低成本、提高可靠性、解决散热问题
提升效率的新型控制算法	采用基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)等方法的控制算法,通过电机数学模型和优化算法,实现最佳电机控制。	提高电机控制精度、降低转矩脉动、提高效率 and 稳定性	解决非线性、不确定性和干扰等问题
高集成度封装技术	采用基于嵌入式功率模块(Embedded Power Module, EPM)等技术的封装技术,通过将功率器件嵌入到印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)中,减少连接件和焊点。	降低寄生参数和故障率、缩小封装体积和质量、提高性能和可靠性	实现复杂系统的建模和仿真、实现多学科多目标的协同优化
高效双面冷却技术	采用微通道换热器(Microchannel Heat Exchanger, MHE)等技术,对控制器两面进行冷却,提高热量散发效率。	降低电机温升、提高电机效率、延长电机寿命	控制散热成本、解决散热与结构之间的冲突
主动降噪控制策略	采用基于模型预测控制等方法,生成反向声波以降低噪声,提高乘坐舒适度	保护轴承免受电蚀、延长轴承寿命、降低噪声	解决噪声源识别、噪声传播路径分析和噪声消除方案设计等问题
功能安全设计技术	采用符合ISO26262标准的设计方法保证电机控制器的功能安全性	防止或减少由于电机控制器故障引起的事故风险	实现电机控制器的故障预防、故障检测和故障处理等功能

转换效率可以降低电机控制器的能量损耗,提高新能源汽车的能量利用率。相关数据表明,2023年全球新能源汽车驱动电机控制器的平均效率约为94%,预计到2025年将达到97%<sup>[10]</sup>。根据这些数据,预计复合年增长率约为1.58%。提高电机控制器效率的技术路径主要包括采用高效率控制算法、降低电机控制器的开关损耗和导通损耗、以及抑制电机控制器的寄生电感。

(3)可靠性。可靠性是指电机控制器在规定的工作条件和工作时间内,不出现故障的概率,反映了电机控制器的稳定性和耐久性。新能源汽车对电机控制器的可靠性要求较高,以保证电机控制器的正常工作,提高新能源汽车的可靠性。提高电机控制器的可靠性的技术路径主要有采用高可靠性SiC器件、优化电机控制器的故障诊断和保护机制、提高电机控制器的抗干扰能力等。

(4)安全性。安全性是指电机控制器在出现故障时,能够及时采取措施,避免对人员和设备造成危害的能力,反映了电机控制器的安全保障水平。新能源汽车对电机控制器的安全性要求较高,以防止电机控制器的故障引发新能源汽车的事故,提高新能源汽车的安全性。提高电机控制器的安全性的技术路径主要有采用符合ISO 26262标准的设计方法、优化电机控制器的故障恢复和隔离机制、提高电机控制器的防火防爆能力等。

## 4 电驱动系统发展趋势

随着新能源汽车市场的快速发展,电驱动系统技术面临更高的性能和效率要求。本章将简要分析电驱动系统的发展趋势,探讨电驱动系统技术未来的创新方向。

### 4.1 电驱系统发展现状和存在的问题

电驱系统的发展现状表现为更成熟的技术和更广泛的应用。随着新材料、新工艺和先进控制算法的引入,电驱动系统的功率密度、效率和智能化水平得到显著提升。在电机设计、控制策略和封装技术方面均取得了重要突破,为新能源汽车的性能提升和成本降低提供了有力支持。形成了以PMSM和交流异步电机为主的产品体系,覆盖多种类型和规格。建立了完善的产业链,实现了各环节的自主化。取得了一些自主知识产权和创新性技术成果,应用于部分新能源汽车品牌和型号。积累了一定的技术人才和经验,形成了一些具有影响力的研究机构和企业<sup>[11]</sup>。

尽管电驱动系统取得了显著进展,但中国电驱动发展仍面临技术创新、产业协同、市场竞争等挑战。主要表现为:

(1)技术水平和产品质量与国际先进水平仍有差距,特别是在高速大功率PMSM、高效率高可靠性交流异步电机、高集成度高智能度电驱动总成等方面。

(2)产品和市场结构不合理,过于依赖低端产品和国内市场,缺乏高端产品和国际市场的竞争力。

(3)产业协同和创新能力不强,存在供应不稳定或质量不过关的问题,以及各环节之间缺乏沟通和协调。

(4)标准体系和法规政策不完善,与国际标准存在不一致或滞后,缺乏技术支持和市场引导。

### 4.2 指导方针

《节能与新能源汽车技术路线2.0》着重强调纯电驱动发展,并设定了2035年的电动化目标。以下是其中提出的3点关键技术指导。

(1)高效电机系统。强调提升驱动电机的功率密度、效率和智能化水平<sup>[12]</sup>。2035年预期乘用车电机功率密度达到7 kW/kg,电机控制器功率密度达到70 kW/L,驱动系统功率比达到3 kW/kg。实现该目标需要在材料、结构和控制方面充分创新<sup>[13]</sup>,如采用高性能永磁材料、扁线绕组、集成设计、数字控制等技术。

(2)多模式适应性。电驱动系统应具备适应不同动力源和传动装置的能力,满足纯电动、插电式混合动力和氢燃料电池汽车的性能需求。

(3)安全性和环境适应性强化。为了构建智能网联汽车技术体系和新产业生态,电机系统必须在复杂道路和交通条件下保持安全运行,并能够在高温、低温、高湿度、腐蚀以及振动等恶劣环境中保持性能的稳定。

### 4.3 电驱系统发展趋势

电驱动系统将继续以高功率密度、高效率、高智能化和高安全性为发展方向,以满足新能源汽车不断提升的性能和可靠性要求。

在此背景下,PMSM将继续占领市场主导地位,但新型电机如永磁体辅助多层磁阻电机、无刷直流电机和无刷双馈电机也将因其结构简单、成本低、可靠性高的优势逐渐受到关注。同时,SiC器件将取代IGBT和MOSFET成为主流选择,可显著提高控制器的效率、功率密度和可靠性,但需解决成本、可靠性和兼容性问题。在控制算法方面,MPC将取代矢量控制和直

接转矩控制成为主流控制算法,提供快速响应和高精度控制,但需解决计算复杂度和参数辨识等问题。此外,高度集成封装将逐步取代传统封装,实现小型化和轻量化,提高功率密度和效率,但需解决热应力、电磁干扰和可靠性评估问题。最后,功能安全将成为设计原则,遵循 ISO 26262 标准,实现故障诊断、故障保护和故障恢复,保障新能源汽车的安全运行。

## 5 结束语

本文明确了电驱动系统在《节能与新能源汽车路线图 2.0》目标中的关键作用。阐述了新能源汽车电驱动系统的五个关键创新方向。首先,在新型高效电机设计方面,开发高效、轻量化的新型电机,如永磁体辅助多层磁阻电机,结合先进材料和制造技术,提高性能和耐久性。其次,智能化控制算法的引入,通过人工智能和大数据分析,优化控制算法,提高控制精度和响应速度。第三,采用 MHE 等先进冷却技术,提高散热效率和系统可靠性。第四,通过 EPM 等技术实现高度集成化设计,将功率器件嵌入 PCB 中,减少连接件和焊点,降低成本,提高集成度和可靠性。最后,全面功能安全设计按照 ISO 26262 标准,提升电驱动系统的功能安全设计,确保故障状态下的安全性能。通过这些创新方向的探索和实施,能够显著提升我国新能源汽车电驱动系统的技术水平和市场竞争力。

通过分析电驱系统发展现状及存在问题,预测其未来发展趋势,提出相应创新方向,并提出了包括电机设计、控制算法、散热技术、功能安全在内的创新方向。旨在为我国电驱动系统的发展提供实质性参考,并为电驱系统未来研究发展方向提供参考。在 MPC 方面,提出了针对计算复杂度和参数辨识的描述分析。在探讨新型电机性能提升策略方面仍显不足,且对冷却技术的实施细节缺乏详细分析。未

来的研究应聚焦于新型电机设计的深入研究、结合人工智能的智能控制算法优化、散热技术的改进以及功能安全设计的强化,以提升系统的可靠性和安全性。

## 参 考 文 献

- [1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] 朱婷, 张雨晴, 李强, 等. 高功率密度电机混合型散热技术综述[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 1-16+52.
- [3] 李全, 暴杰, 赵慧超, 等. 车用电驱动系统技术发展趋势及其技术要求[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(23): 188-192.
- [4] 尹彦秋, 张俊深. 纯电动汽车驱动系统的技术现状与发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2021(17): 215-217.
- [5] 高超. 新能源汽车电机驱动系统关键技术展望研究[J]. 内燃机与配件, 2021(17): 209-210.
- [6] 中信证券. 新能源汽车电驱动系统专题报告: 技术迭代推动降本增效. [EB/OL].(2023-03-08)[2024-01-08].<https://www.dongchedi.com/article/7207982625682752037>.
- [7] 招商银行研究院. 新能源汽车之电驱动系统篇: 产业链重构, 千亿赛道群雄逐鹿[EB/OL].(2022-11-24)[2024-8-14].<https://new.qq.com/rain/a/20221124A071ZQ00>.
- [8] 贺坚. 新能源车用 IGBT 模块封装技术研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(9): 78-80.
- [9] 刘喜涛. 电动汽车用驱动电机功能安全测试研究[J]. 汽车电器, 2024, (2): 13-15.
- [10] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究报告 2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1-192.
- [11] 暴杰, 赵慧超, 李全. 140 kW 高性能集成式电驱动产品开发[J]. 汽车文摘, 2021(2): 44-50.
- [12] 罗锋, 龚循飞, 邓建明, 等. 基于 AI 的电驱动系统的未来趋势与展望 [J]. 汽车实用技术, 2024, 49 (5): 14-18.
- [13] 董雪松. 中国新能源汽车行业关键金属需求预测与可持续供应保障研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.

(责任编辑 梵玲)