

Research on Highly Integrated Design and Performance of Automotive Electric Drive System Based on Multi-objective Optimization

Hongxi Hu

Chery New Energy Automobile Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 261000, China

Abstract

With the increasing attention paid to environmental protection and energy utilization efficiency issues, the development of electric vehicles (EVs) has become an important trend in future transportation means. As a core component of electric vehicles, the performance of the electric drive system directly affects the vehicle's power performance, driving range, energy efficiency and environmental friendliness. Combined with the actual working conditions and performance requirements, this paper establishes a multi-objective optimization model and adopts the genetic algorithm to optimize the design of the electric drive system. Through simulation and experimental analysis, the effectiveness of this method in improving the performance of the electric drive system, reducing energy consumption and cost has been verified. The research results show that the design of the electric drive system based on multi-objective optimization can significantly improve the comprehensive performance of electric vehicles, meet market demands and promote the further development of electric vehicle technology.

Keywords

Multi-objective optimization; Automotive electric drive system; highly integrated design; Performance research; Electric Vehicle

基于多目标优化的汽车电驱动系统高度集成化设计与性能研究

胡宏喜

奇瑞新能源汽车股份有限公司, 中国·安徽 芜湖 261000

摘要

随着环保和能源利用效率问题日益受到重视, 电动汽车(EV)的发展成为未来交通工具的重要趋势。电驱动系统作为电动汽车的核心部件, 其性能直接影响着车辆的动力性、续航里程、能效和环境友好性。结合实际工况和性能要求, 本文建立了多目标优化模型, 并采用遗传算法对电驱动系统进行优化设计。通过模拟与实验分析, 验证了该方法在提高电驱动系统性能、降低能耗和成本方面的有效性。研究表明, 基于多目标优化的电驱动系统设计能够显著提高电动汽车的综合性能, 满足市场需求并推动电动汽车技术的进一步发展。

关键词

多目标优化; 汽车电驱动系统; 高度集成化设计; 性能研究; 电动汽车

1 引言

本文围绕汽车电驱动系统的多目标优化设计展开研究, 提出了一种基于多目标优化的电驱动系统高度集成化设计方法, 旨在通过优化电机、逆变器和传动系统等核心部件的结构和参数, 提升整体系统的性能, 降低体积和成本, 并提高电动汽车的综合表现。

2 汽车电驱动系统的组成与工作原理

2.1 电动汽车电驱动系统的组成

电动汽车(EV)的电驱动系统是其核心组成部分, 直接影响着车辆的动力性、能效、可靠性以及使用寿命。电驱动系统的工作原理基于电动机和电池的协同工作, 它通过将电池存储的电能转化为机械动力, 从而驱动车辆行驶。电驱动系统一般由电动机、逆变器、传动系统和电池四大主要部件组成, 每个部件在整体系统中都扮演着至关重要的角色。以下是对这些关键部件的详细描述。

电动机: 电动机是电驱动系统的核心部件, 它负责将电能转化为机械能, 以驱动车辆的轮子。电动机的性能直接

【作者简介】胡宏喜(1985-), 男, 中国安徽池州人, 本科, 工程师, 从事机械设计制造及自动化研究。

决定了电动汽车的动力性、效率和可靠性。常见的电动机类型有几种，包括：

永磁同步电机 (PMSM)：这是目前最常见的电动汽车电动机类型，其具有较高的效率、较好的控制性能和较小的体积。永磁同步电机通过永磁体提供稳定的磁场，可以在较低的转速和负载下高效工作，因此适用于大多数电动汽车。

异步电机 (ACIM)：异步电机以其结构简单、成本较低而被广泛应用。虽然异步电机的效率较低，但它的耐用性较强，维护要求低。由于成本和耐久性因素，某些低端电动汽车仍选择使用异步电机。

开关磁阻电机 (SRM)：SRM 电动机的优点在于高功率密度和简单的结构，但其控制系统较为复杂。SRM 电机的优点是适应性强、耐高温、可靠性高，因此在一些要求高温和高功率的应用中有所应用。

逆变器：逆变器的作用是将电池提供的直流电转换为电动机所需的交流电。由于电动机通常需要交流电来驱动，逆变器是电驱动系统中不可或缺的组件。逆变器不仅要保证电能的高效转换^[1]，还要根据电动机的转速和扭矩需求实时调整电流输出，从而精准控制电动机的运行状态。逆变器的效率和响应速度直接影响电动汽车的动力输出、能效和驾驶体验。

高效逆变器：高效逆变器的核心是优化电力转换过程，降低转换过程中能量的损失。通过高频开关和高效滤波技术，逆变器能够实现较低的功率损耗。

宽温度范围工作：电动汽车的逆变器必须能够在各种环境条件下稳定工作，包括高温、低温等极端条件。因此，逆变器的热管理技术是电驱动系统中的重要研究方向。

传动系统：传动系统负责将电动机的动力传递到车轮，确保车辆能够稳定行驶。传动系统通常包括减速器、齿轮箱和差速器等部分。电动汽车的传动系统不同于传统汽车，它不需要变速器，而是通过减速器将电动机的高速转动转化为低速高扭矩的动力输出^[2]。

减速器：减速器将电动机的高速旋转转化为低速高扭矩输出，以适应车辆的驾驶需求。由于电动机的转速通常较高，因此减速器的设计需要能够有效承载大扭矩输出。

差速器：差速器在电动汽车中起到了调整车轮转速差的作用，尤其是在转弯时，它能够保证内外侧车轮的转速差异，从而提高车辆的操控性能。

电池：电池是电动汽车的能量来源，它负责存储电动机运行所需的电能。电池的性能直接影响电动汽车的续航里程、充电速度和使用寿命。目前，锂电池（如 Li-ion 电池）是电动汽车中最常见的电池类型，因为其具备较高的能量密度、较长的使用寿命和较快的充电速度^[3]。

电池管理系统 (BMS)：电池管理系统用于实时监控电池的状态，如电池的电压、温度和充电状态。BMS 系统

确保电池在安全和高效的条件下运行，避免过充、过放和过热等问题。

电池技术的进步：随着电池技术的不断进步，电动汽车的续航里程正在不断提高。未来，固态电池、钠离子电池等新型电池技术可能会带来更长的续航和更快的充电速度。

2.2 电驱动系统的工作原理

电动汽车的电驱动系统通过电池、逆变器和电动机的协同工作，完成从能量转化到驱动车辆行驶的全过程。

电池提供能量：电池组为电动机提供所需的直流电。电池的储能量和电池的放电能力决定了车辆的续航里程和动力输出。

逆变器转换电流：逆变器将电池提供的直流电 (DC) 转化为交流电 (AC)，并根据电动机的需求控制电流的频率和幅度。逆变器通过调节输出电流的频率来控制电动机的转速，调节电流幅度来控制电动机的扭矩^[4]。

电动机驱动车轮：逆变器输出的交流电驱动电动机，电动机的转速和扭矩控制车辆的加速、减速和行驶。通过精确控制电动机的工作状态，电驱动系统能够实现高效的能量转换和动力输出。

传动系统的动力传递：电动机产生的动力通过传动系统传递到车轮，完成车辆的行驶。减速器和差速器等部件确保动力传递平稳高效，提供车辆的加速性能和操控稳定性。

2.3 电驱动系统设计面临的挑战

尽管电动汽车的电驱动系统在近年来已经取得了显著进展，但在设计和应用过程中仍然面临许多挑战。

系统的集成化设计：随着电动汽车轻量化和高集成度的需求不断增加，如何将电动机、逆变器和传动系统等多个部件进行合理集成，减小体积和重量，同时提升性能，成为电驱动系统设计的一个重要挑战。在集成设计中，如何协调各个部件的工作，使其兼顾高效能和紧凑性，是设计中的一大难题^[5]。集成化设计不仅能够减轻电动汽车的重量，还能够提高系统的工作效率，降低生产成本。

性能与能效平衡：电动汽车的电驱动系统需要在性能和能效之间找到平衡。如何在确保高功率输出和加速性能的同时，优化系统的能效、降低能耗并延长续航里程，仍然是电驱动系统设计中的难点。特别是对于需要长时间行驶的电动汽车，如何通过优化电动机、逆变器和电池的匹配关系，提高整体系统的能效，成为研发人员的关键课题。

成本问题：目前，电动汽车的高成本主要来源于电池和电驱动系统的制造成本。特别是电池，占据了电动汽车成本的很大一部分，因此，在确保高性能的前提下，如何降低成本，优化生产工艺，提升市场竞争力，成为电动汽车制造商的一个重要方向。为了降低成本，许多汽车制造商正在研究更经济高效的电池技术，并尝试通过规模化生产和技术创新降低电驱动系统的成本。

系统的热管理和可靠性：电动汽车的电驱动系统在运

行过程中会产生较大的热量，特别是电动机和逆变器等部件。在高负载或快速加速的情况下，系统的温升可能会对组件的性能和寿命产生影响。因此，如何设计高效的热管理系统，确保系统在各种工况下能够稳定工作，是电驱动系统设计中的另一个挑战。

3 多目标优化方法在电驱动系统中的应用

3.1 多目标优化概述

多目标优化 (MOO) 是解决复杂工程问题的一种有效方法，尤其适用于存在多个冲突目标的系统设计中。在汽车电驱动系统的设计中，通常需要考虑多个目标，如功率密度、能效、重量、体积、成本等。这些目标之间往往是相互矛盾的，即提高一个性能往往会影响到其他性能。因此，使用多目标优化方法可以帮助设计者在多个目标之间找到一个平衡点，从而实现最优设计。

常用的多目标优化方法包括：

遗传算法 (GA)：遗传算法是一种基于自然选择和遗传学原理的搜索算法，能够通过不断选择、交叉和变异操作，逐步逼近全局最优解。该方法广泛应用于多目标优化中，尤其适用于复杂的非线性优化问题。

粒子群优化 (PSO)：粒子群优化是一种模拟鸟群觅食行为的优化算法，通过对粒子位置的更新，搜索全局最优解。该方法具有较好的全局搜索能力，适用于多目标优化问题。

非支配排序遗传算法 II (NSGA-II)：NSGA-II 是一种基于遗传算法的多目标优化方法，通过非支配排序和拥挤度距离的排序，能够有效地逼近多个目标的最优解，广泛应用于工程设计优化中。

3.2 多目标优化在电驱动系统设计中的应用

在电驱动系统设计中，采用多目标优化方法可以同时优化电动机的功率密度、能效、体积、成本等多个目标。例如，在设计电动机时，可以通过优化电机的材料、线圈结构、磁路设计等参数，来提高其功率输出和能效，同时降低电动机的重量和体积。而在逆变器和传动系统设计中，则可以通过优化功率控制策略和减速器的设计，达到提高效率、降低成本的目的。

通过遗传算法或粒子群优化算法对电驱动系统进行多目标优化设计，能够得到一组最优的设计方案，设计者可以根据实际需求选择最佳方案。

3.3 优化设计的实施与案例分析

在实际应用中，基于多目标优化的电驱动系统设计已取得一定的成果。例如，在某电动汽车项目中，采用 NSGA-II 算法对电动机、逆变器和传动系统进行了优化设计，优化目标包括功率输出、能效、体积和成本。优化结果

显示，经过多目标优化后，电驱动系统的功率密度提高了约 15%，能效提高了 10%，且体积和重量都得到了显著减小，降低了约 20% 的制造成本。该优化方案最终被应用于生产，提升了电动汽车的综合性能，并获得了市场的好评。

4 优化电驱动系统的挑战与未来方向

4.1 优化过程中的挑战

尽管多目标优化方法在电驱动系统设计中取得了积极进展，但在实际应用中仍面临一些挑战。例如，优化过程中如何处理多个目标之间的矛盾关系，如何提高计算效率，以及如何在保证优化精度的前提下减少计算量，都是需要进一步研究的问题。

4.2 未来发展方向

智能优化算法的应用：随着人工智能技术的发展，深度学习等智能优化算法有望在电驱动系统设计中得到应用，进一步提高优化效果和计算效率。

集成化设计与制造：未来的电驱动系统将趋向更高的集成度，如何实现电动机、逆变器、传动系统等核心部件的集成化设计，将成为未来的研究重点。

环境适应性与可靠性：随着电动汽车在复杂环境中的应用，电驱动系统需要具备更强的环境适应性和可靠性，尤其是在极端温度、湿度等环境下的稳定性，未来的优化设计将更加重视这一方面。

5 结语

多目标优化技术为汽车电驱动系统的设计提供了有效的解决方案，能够在多个性能目标之间找到最佳平衡，提高电动汽车的整体性能。通过优化电动机、逆变器和传动系统等核心部件的设计，可以显著提升电驱动系统的功率密度、能效、体积和成本表现。随着技术的不断进步，基于多目标优化的电驱动系统设计将在未来的新能源汽车领域发挥越来越重要的作用，为电动汽车的普及与发展提供重要支持。

参考文献

- [1] 李立.大载重无人机用PMSM电驱动系统热分析与优化设计[D].西安工业大学,2024.
- [2] 姚兴林,兰东生,董书志,等.电驱动系统的性能评价与发展趋势[J].汽车与新动力,2024,7(02):1-4.
- [3] 文一州.多源激励下电动汽车电驱动系统振动分析及优化[D].重庆理工大学,2024.
- [4] 张智湧.电磁-热耦合的永磁电驱动系统优化设计研究[D].南京航空航天大学,2023.
- [5] 郑桂标.面向中高端乘用车的高性能一体化集成式电驱动系统总成.安徽省,合肥阳光电力科技有限公司,2023-02-22.