

复合功率分流式混合动力汽车能量管理策略

邱亮

江铃汽车股份有限公司, 江西 南昌 330052

摘要： 为优化复合功率分流式混合动力汽车（CPHEV）性能，并促进新能源控制系统的发展，文章首先概述 CPHEV 的系统结构、工作原理及模式，同时建立系统动力学模型；其次，阐述现有能量管理策略的分类及其优缺点，并指出当前面临的挑战与不足。对此，文章深入探究与探讨基于动态规划、等效燃油消耗最小化以及机器学习三种能量管理策略。动态规划策略利用全局优化提升燃油经济性；等效燃油消耗最小化策略实现了局部最优控制；而机器学习策略则利用大数据与智能算法来进行预测与优化。此外，文章还构建综合评价指标体系，同时，运用多目标优化方法对策略进行了优化，以为 CPHEV 的能量管理提供理论支持与实践指导。

关键词： 功率分流；混合动力汽车；能量管理策略

Energy Management Strategy for Composite Power Split Hybrid Electric Vehicles

Qiu Liang

Jiangling Motors Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330052

Abstract： In order to optimize the performance of compound power split hybrid electric vehicles (CPHEV) and promote the development of new energy control systems, this article first outlines the system structure, working principle, and mode of CPHEV, and establishes a system dynamics model; Secondly, elaborate on the classification and advantages and disadvantages of existing energy management strategies, and point out the challenges and shortcomings currently faced. The article delves into and discusses three energy management strategies based on dynamic programming, minimizing equivalent fuel consumption, and machine learning. Dynamic programming strategy utilizes global optimization to improve fuel economy; The strategy of minimizing equivalent fuel consumption has achieved local optimal control; Machine learning strategies utilize big data and intelligent algorithms for prediction and optimization. In addition, the article also constructs a comprehensive evaluation index system, and uses multi-objective optimization methods to optimize the strategy, in order to provide theoretical support and practical guidance for the energy management of CPHEV.

Keywords： power splitting; hybrid electric vehicles; energy management strategy

近年来，全球能源危机与环境污染问题日益严峻，新能源汽车的普及与应用成为解决这些问题的重要途径。混合动力汽车（HEV）作为过渡车型，兼具纯电动汽车与燃油车的优点，在新能源领域表现出巨大的潜在应用价值。而 CPHEV 凭借其高效的能量分配机制，进一步提升了 HEV 的性能。目前，如何优化 CPHEV 的能量管理策略，以实现更好的排放性能、燃油经济性并有效延长电池寿命，仍是当前研究的热点。本文深入研究汽车能量管理策略，旨在为 CPHEV 能量管理提供新的思路与方法。

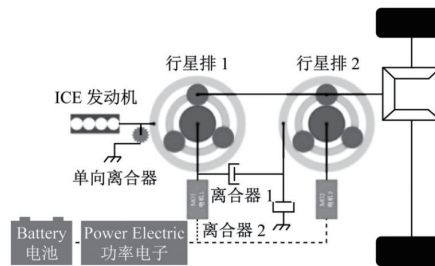
一、汽车系统与能量管理策略

（一）混合动力汽车系统概述

1. 系统结构、工作原理及模式

CPHEV（复合功率分流式混合动力汽车）核心部件涵盖发动机、电动机、行星齿轮机构及电池等，这些关键组件通过特定的连接方式相互关联，共同构建了一个高效的能量传递网络。其中，发动机作为主要的动力源，电动机负责提供辅助动力及能量回收功能，行星齿轮机构则负责实现动力的分流与汇流，而电池则作为储能装置，用以平衡整个系统的能量需求与供应。各部件

间的协同工作确保了 CPHEV 在不同工况下的高效运行。混合动力系统如图1所示。



> 图1 混合动力系统示意图

作者简介：邱亮（1984-），男，汉族，江西省南昌市人，本科，工程师，研究方向：新能源控制系统。

根据行驶工况的不同, CPHEV 能够灵活切换工作模式以优化能量使用效率。在纯电动模式下, 系统完全依赖电动机驱动, 实现零排放行驶; 混合动力模式则有效整合发动机与电动机的动力输出, 以更好地满足更高的功率需求; 而增程模式则通过发动机为电池充电, 来达到延长电动行驶里程的目的^[1]。不同模式下, 系统均通过精细的能量分配策略, 确保动力输出的同时, 以此最大化能源利用效率。车辆运行模式与各动力源工作状态详见表1。

表1 车辆运行模式与各动力源工作状态

运行模式	离合器1	离合器2	单向离合器	电机1 功能	电机2 功能
纯电驱动 模式1	接合	分离	分离	不工作	电动机 驱动
纯电驱动 模式2	接合	分离	接合	电动机 驱动	电动机 驱动
低速增程 模式	接合	分离	分离	发电机 发电	电动机 驱动
固定速比 增程模式	接合	接合	分离	不工作	电动机/ 发电机
高速增程 模式	分离	接合	分离	电动机/ 发电机	电动机/ 发电机

2. 系统动力学模型

为深入研究 CPHEV 能量管理策略, 首要任务是构建精确的系统动力学模型。该模型需涵盖发动机、电动机以及电池等核心组件的数学描述, 确保能够全面且准确地反映各部件在复杂动态工况下的实际性能表现。具体而言, 发动机模型需考虑其燃油消耗特性、功率输出曲线及热效率等因素; 电动机模型则需涵盖转矩转速特性、效率曲线及能量回收能力; 而电池模型则需关注其充放电特性、内阻变化及 SOC 管理^[2]。模型构建过程中, 还要收集大量的实验数据与工程经验, 对各部件的数学模型完成精细校准与验证, 以确保模型的准确性与可靠性。

(二) 能量管理策略概述

1. 现有能量管理策略分类及分析

能量管理在 CPHEV 中发挥着不可或缺的作用, 其根据控制逻辑的不同可分成基于规则与基于优化的管理策略两大类。其中, 基于规则的管理策略主要依赖预设的逻辑规则完成决策, 实施简便且易于实现; 而基于优化的管理策略则利用数学优化算法来寻求全局和局部最优解, 以最大化系统性能。目前, CPHEV 领域已广泛探索并应用了多种能量管理策略。基于规则的策略, 如电量消耗-电量保持 (CD-CS) 策略, 通过提前设置明确的阈值来控制动力源的工作状态, 但它在应对复杂多变工况时显得灵活性不足; 基于优化的策略, 如动态规划 (DP) 与等效燃油消耗最小化策略 (ECMS), 能够更精确、高效地根据当前工况灵活调整能量分配, 显著提高了燃油经济性, 然而, 其计算复杂度与实时性要求也相应提高^[3]。这些策略各有优劣, 适用于不同的应用场景与性能需求。

2. 挑战与不足

尽管当前 CPHEV 能量管理策略的研究已取得显著进展, 然而, 仍面临诸多挑战。一方面, 如何平衡策略的优化效果与计算复杂度, 实现高效实时的能量管理, 是当前研究的难点之一。另一方面, 伴随新能源汽车技术的快速发展, 对能量管理策略的自

适应性、智能化提出了更高的要求。未来研究应聚焦于开发更灵活、先进的能量管理策略, 以更好地应对日益复杂多变的行驶工况, 同时探索人工智能、机器学习等新技术在能量管理中的应用潜力, 以推动 CPHEV 能量管理策略的创新与发展^[4]。

二、混合动力汽车能量管理策略

(一) 基于动态规划的能量管理策略

1. 动态规划原理及其应用优势

动态规划算法作为一种解决多阶段决策优化问题的有效方法, 其核心在于通过逆向递推来求解最优策略, 以达到全局最优解。在 CPHEV 的能量管理策略中, 动态规划算法展现出显著优势。具体而言, 通过精确预测未来工况, 动态规划算法能够精准、高效地计算出最优的能量分配方案, 从而在满足动力需求的同时, 最大化燃油经济性, 并最小化排放。值得一提的是, 该算法还能有效管理电池状态 (如 SOC), 延长电池使用寿命, 并提升系统整体效率。

2. 状态变量与控制变量选择

在基于动态规划的 CPHEV 能量管理策略中, 状态变量与控制变量的选择至关重要。其中, 状态变量通常选择可以全面反映系统当前状态的参数, 如电池 SOC, 它直接关联到能量分配与电池健康。而控制变量则涉及电动机转矩、发动机转矩等, 这些变量经过动态规划算法的优化, 有望在不同工况下实现最优的能量分配。通过科学选择状态变量与控制变量, 动态规划算法能够更精确、高效地模拟 CPHEV 的实际运行状况, 从而为能量管理策略的制定提供科学依据。

3. 优化目标函数构建与仿真验证

为制定有效的能量管理策略, 需构建以燃油经济性为优化目标的函数。该函数一方面需要考虑当前时刻的能量消耗, 另一方面还要前瞻性地预测未来工况, 以实现全局最优。与此同时, 为平衡燃油经济性与电池寿命, 还需在目标函数中纳入电池 SOC 的维持、排放等因素。在 MATLAB/Simulink 环境下, 通过构建仿真模型, 可以验证基于动态规划的能量管理策略的有效性。仿真结果能够直观展示能量管理策略对燃油经济性、电池寿命等关键指标的影响, 为策略的优化提供数据支持。

(二) 基于等效燃油消耗最小化的能量管理策略

1. 最小化原理与求解方法

等效燃油消耗最小化策略 (ECMS) 作为一种实时优化的能量管理策略, 其核心在于将电能消耗转化成等效的燃油消耗, 据此构建一个统一的优化目标函数。该能量管理策略通过引入等效因子, 将电池 SOC 的变化量折算成等效的燃油消耗量, 使得在优化过程中能够同时考虑燃油经济性与电池 SOC 的维持^[5]。而 ECMS 的求解方法通常涉及对系统动力学模型的精确建模, 以及基于瞬时优化原则的算法实现, 以此保证在每个控制周期内均能找到最优的能量分配方案。

2. 等效因子确定与动态调整

等效因子是 ECMS 策略中的关键参数, 它直接决定了电能消耗与燃油消耗之间的等效关系。通常情况下, 等效因子的选择需综合

考虑车辆工况、电池状态、驾驶需求等多个因素。实际应用中,为了进一步提升能量管理策略的优化效果与自适应性,等效因子往往需要结合实时工况与车辆状态进行动态灵活调整。通过运用先进的控制算法与机器学习技术,能够实现等效因子的在线优化,保证了 ECMS 策略在不同运行条件下都可以保持较好的优化性能。

3. 策略实现与仿真验证

在 AMESim 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台上,能够实现 ECMS 策略的高效建模与仿真验证。通过建立精确的 CPHEV 系统模型,同时设置合理的仿真工况,可以全面、精准评估 ECMS 策略在电池 SOC 维持、燃油经济性等方面的表现。此外,将 ECMS 策略与动态规划策略进行对比分析,可以发现两者在计算复杂度、优化效果等方面的差异。其中,动态规划能量管理策略尽管能够实现全局最优解,然而,其计算复杂度较高,不能很好地应用于实时控制;而 ECMS 策略则能够通过简化优化问题,实现较好的实时性与优化效果,由此成为一种具有广泛应用前景的能量管理策略^[9]。

(三) 基于机器学习的能量管理策略

1. 机器学习算法及其应用潜力

近年来,机器学习在各个领域展现出强大的应用潜力。在 CPHEV 的能量管理策略中,机器学习算法同样发挥着至关重要的作用。常用的机器学习算法,如神经网络、支持向量机等,通过从大规模历史数据中学习系统的运行规律与模式,可以实现对复杂工况下能量分配的优化决策。这些先进算法一方面能够较好地处理非线性关系,另一方面还可以适应复杂多变的运行条件,为 CPHEV 的能量管理策略提供了全新的解决方案。

2. 特征选择与数据预处理

在将机器学习算法应用于 CPHEV 能量管理之前,需要先对车辆的运行数据进行一系列预处理。特征选择作为其中的关键环节,主要涉及从众多变量中挑选出对能量管理策略影响最大的特征变量,如加速度、电池 SOC、车速、发动机转矩等。这些特征变量可以全面反映车辆的运行状态与能量需求。数据预处理操作主要涉及数据清洗、缺失值处理、异常值检测以及归一化处理等步骤,旨在提高数据质量,保证机器学习模型的训练效果^[7]。

3. 模型训练、验证与应用

准备好高质量的数据集后,便可以使用大量历史数据来训练机器学习模型。通过持续调整模型的参数与结构,能够使模型更好地拟合数据,从而提高预测与决策的准确性。此外,交叉验证等方法的应用有助于评估模型的泛化能力,确保其在未见过的数据上也可保持良好的性能。一旦模型训练完成并经过充分验证,便可将其应用到 CPHEV 的实时能量管理中^[8]。

三、能量管理策略的综合评价与优化

(一) 综合评价指标体系构建

为了全面客观评估 CPHEV 能量管理策略的性能,本研究建立了一个综合评价指标体系。该体系主要涵盖燃油经济性、排放性能、电池寿命以及驾驶舒适性等多个维度,旨在从不同角度综

合评价能量管理策略的效果。其中,燃油经济性作为衡量能量管理策略节能效果的关键指标,直接反映了策略在降低燃油消耗方面的能力;排放性能则关注能量管理策略对车辆尾气排放的影响,体现了其在环保方面的贡献;电池寿命作为评价策略对电池健康影响的重要指标,对于延长车辆使用寿命具有重要意义;而驾驶舒适性则通过评估能量管理策略对车辆动力响应、平顺性等方面的影响,反映出其对提升驾乘体验的贡献^[9]。该综合评价指标体系的构建,为后续策略的优化与验证提供了科学依据。

(二) 多目标优化方法应用与策略优化

针对 CPHEV 能量管理策略的优化问题,本研究引入了多目标优化方法,如帕累托前沿法、加权和法等,这些方法能够在综合考虑多个优化目标的同时,最大限度地寻找各目标之间的最佳平衡点,从而制定出更为全面、有效的能量管理策略。其中,加权和法通过将不同目标的优化值进行加权求和,巧妙转化成单一目标进行优化;而帕累托前沿法则通过寻找所有非支配解,即一个解在某个目标上的优化同时不会导致其他目标恶化,来揭示多目标优化问题的本质^[10]。策略优化过程中,研究基于综合评价指标体系,运用多目标优化方法对现有能量管理策略完成了优化与改进,并通过仿真与实车试验验证了优化效果。

四、结束语

综上所述,本文重点研究与探讨了基于动态规划、等效燃油消耗最小化及机器学习的能量管理策略在提升 CPHEV 性能方面的应用优势,这不仅有助于大幅提高燃油经济性,还能够显著优化排放性能与电池寿命,从而为新能源控制系统的发展与创新提供强有力的技术支撑。然而,现有研究仍存在一定不足,如复杂工况下的实时性、适应性等仍有待进一步提升。未来,将持续探索更先进的控制算法与智能技术,以推动与促进 CPHEV 能量管理的创新与发展。

参考文献

- [1] 杜爱民,陈森伊,张东旭.功率分流式混合动力汽车能量管理策略研究[J].机械设计与制造,2024(6):121-127.
- [2] 胡后征.燃料电池混合动力汽车能量管理策略研究进展[J].品牌研究,2024(6):0093-0095.
- [3] 虞志浩,赵又群,潘陈兵,何鲲鹏,李丹阳.基于 TD3-PER 的氢燃料电池混合动力汽车能量管理策略研究[J].汽车技术,2024(1):13-19.
- [4] 王欢,葛帅帅,姜艳军,张志刚,郭栋,李明.混合动力汽车功率分流传动系统扭转振动及其影响因素研究[J].机械科学与技术,2024,43(2):203-211.
- [5] 李东兵,王妮,马涛涛.混合动力汽车能量管理策略研究[J].机械设计与制造,2024(6):193-197203.
- [6] 戴科峰,胡明辉.混合动力汽车深度强化学习分层能量管理策略[J].重庆大学学报,2024,47(1):41-51.
- [7] 崔清章,许昆朋.功率分流式 PHEV 车辆动力学模型与能量管理策略研究[J].小型内燃机与车辆技术,2024,53(4):21-25.
- [8] 张雪钊,周沁悠.基于动态规划的混合动力汽车能量管理策略优化[J].农机使用与维修,2024(5):14-17.
- [9] 游杰.基于 Q-learning 的混合动力汽车能量管理策略[J].汽车电器,2024(8):24-2730.
- [10] 曾晓帆,胡明辉,徐磊.基于实车试验大数据分析的插电式混合动力汽车能量管理策略解析[J].重庆大学学报,2023,46(2):11-2942.