

# 混合动力汽车控制策略的分析与展望

牛礼民<sup>1</sup>,朱奋田<sup>1</sup>,张泉泉<sup>1</sup>,赵雅芝<sup>2</sup>,宗发新<sup>1</sup>,郑飞宇<sup>3</sup>

(1. 安徽工业大学机械工程学院,安徽 马鞍山 243032;2. 安徽工业经济职业技术学院,安徽 合肥 230000;

3. 国网固镇县供电公司,安徽 蚌埠 233700)

**摘要:**能量控制策略是混合动力汽车的(HEV)核心技术,采用HEV能量控制策略对多能源动力总成及其部件进行协调配合,可提高整车燃油经济性,同时可兼顾优化发动机排放、蓄电池寿命、驾驶性能和整车成本等。HEV能量控制策略可分为基于规则、基于优化和基于智能控制三类,综述不同类型HEV能量控制策略的研究应用现状,分析其优势与不足。结果表明:基于规则的能量控制策略早期被广泛应用于实车;基于优化的能量控制策略是当前研究的主体;对于基于智能控制策略,多智能体技术的引入为HEV控制策略提供了一种新的研究途径。不同改进型优化控制算法、基于智能交通的精准预测技术与多智能体技术相结合是HEV控制策略未来的发展方向。

**关键词:**混合动力汽车;能量控制策略;智能控制

中图分类号:TU 411.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-7872.2020.04.011

## Analysis and Prospect of Control Strategy for Hybrid Electric Vehicle

NIU Limin<sup>1</sup>, ZHU Fentian<sup>1</sup>, ZHANG Quanquan<sup>1</sup>, ZHAO Yazhi<sup>2</sup>, ZONG Faxin<sup>1</sup>, ZHENG Feiyu<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Anhui Vocational and Technical College of Industrial Economics, Hefei 230000, China; 3. State Grid Guzhen County Power Supply Company, Bengbu 233700, China)

**Abstract:** Energy control strategy is the core technology of hybrid electric vehicle (HEV). The energy control strategy of HEV is employed to coordinate the multi-energy power train and its components, which can improve the fuel economy of the whole vehicle. Meanwhile, the requirements of engine emission, battery life, driving performance and vehicle cost can be considered. The energy control strategies of HEV can be divided into three categories: rule-based, optimization based and intelligent control. The research and application status of different types of HEV energy control strategies were summarized, and their advantages and disadvantages were analyzed. The results show that the energy control strategy based on rules is widely used in real vehicles in the early days. Energy control strategy based on optimization is the main body of current research. In the research of intelligent control strategy, the introduction of multi-agent technology provides a new research approach for HEV control strategy. The future development direction of HEV control strategy is the combination of different improved optimization control algorithms, accurate prediction technology based on intelligent transportation and multi-agent technology.

**Key words:** hybrid electric vehicles; energy control strategy; intelligent control

环境污染、新能源电池核心技术短时间内难以突破,使得混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)的

收稿日期:2020-07-30

基金项目:安徽省教学研究重点项目(2019jyxm0140);浙江省激光加工机器人重点实验室/中国机械工业激光精细加工与检测技术重点实验室开放基金项目(lzsy-07)

作者简介:牛礼民(1976—),男,安徽肥东人,博士后,副教授,主要研究方向为车辆动态性能模拟和电动汽车控制技术。

研究价值日益凸显<sup>[1]</sup>。HEV是在传统汽车的基础上配备电动机/电池驱动系统的一种新能源汽车,存在两个或以上的动力源,不同动力源之间的能量分配直接影响整车的燃油经济性、动力性、驾驶舒适性等。因此,能量控制策略是HEV的核心技术。HEV能量控制策略的主要目标是满足驾驶员对动力性的需求,维持蓄电池充电、优化传动系效率、降低油耗和排放,从而降低整车成本,协调多种能量源,实现整车系统性能的改善和提高。最初的HEV能量控制策略是依赖工程经验制定的基于规则(rule-based, RB)的控制策略<sup>[2]</sup>,如恒温器式、功率跟随式和模糊逻辑(fuzzy logical, FL)控制等,发展到基于各种优化算法的HEV能量控制策略,如全局优化控制策略(动态规划(dynamic programming, DP)、随机动态规划(stochastic dynamic programming, SDP)、遗传算法(genetic algorithm, GA)和凸优化(convex programming, CP)),瞬时优化控制策略(庞特里亚金最小原理(pontryagin's minimum principle, PMP)、等效油耗最小控制(equivalent consumption minimization strategy, ECMS)及模型预测控制(model predictive control, MPC))。近年来,随着人工智能、大数据和云计算的兴起,基于智能控制策略成为当前学者研究的热点,如基于神经网络、基于智能交通系统(intelligent transportation systems, ITS)和基于多智能体(multi-agent system, MAS)的能量控制等。为此,文中综述基于规则、基于优化和基于智能控制的HEV能量控制策略,在对比分析HEV能量控制策略的基础上展望HEV的研究方向。

## 1 基于规则的能量控制策略

基于规则的能量控制策略是基于启发式、直觉、人类专业知识、工程经验、数学模型制定的,通常没有预先定义驾驶循环的先验知识,主要思想是负载均衡<sup>[3]</sup>。基于规则的能量控制策略可分为确定型和模糊规则的控制策略。

### 1.1 基于确定规则的控制策略

基于确定规则的控制策略是根据发动机的MAP图,将发动机的工作区分高负荷区、中负荷区和低负荷区三部分,利用电机/电池协调输出优化发动机工作特性。根据道路负载、驾驶员油门踏板信号、制动踏板信号、电池荷电状态(state of charge, SOC)、车速等判断当前行驶环境下所需功率对应的发动机负荷区,确定不同的工作模式<sup>[4]</sup>。基于确定规则的控制策略主要分为恒温器式和功率跟随式控制。恒温器(开/关)式控制策略简单且易实现,但其仅适用于串联混合动力汽车。恒温器模式下动力电池组需满足整车行驶的峰值功率需求,存在频繁的充放电情况,对电池使用寿命有不利影响<sup>[5]</sup>。功率跟随式(基线)控制策略保持电池SOC值始终在一个稳定区间,可有效避免蓄电池的工作循环<sup>[6]</sup>,延长电池寿命,实现了发动机动力的合理分配<sup>[7]</sup>,但降低了部分发动机的效率和排放性能。

基于确定规则的能量控制策略规则简单,易于实现,可根据控制效果不断完善修改规则,在线应用可行性高。其主要不足是依赖工程经验,无法保证最优能量分配,若规则设置不合理,则控制效果变差。

### 1.2 基于模糊规则的能量控制策略

HEV传动系统是一个多领域、非线性和时变的对象,基于模糊规则的能量控制策略通过构建模糊逻辑控制器<sup>[8-11]</sup>来实现实时次优功率分配,提高整车性能。其用“高”“中”“低”等模糊参数来代替基于确定规则的布尔逻辑,控制更精确,主要分为模糊逻辑和模糊自适应控制。

模糊逻辑控制策略通过模糊规则推理机制使其具有较强的鲁棒性和适应性<sup>[12]</sup>。彭涛等<sup>[13]</sup>提出了模糊逻辑功率分配策略,采用该策略优化发动机工作点、电机效率和电池组荷电状态平衡,仿真验证了该策略可改善车辆的经济性和工况的适应性。邓涛等<sup>[14]</sup>采用基于规则的模糊控制策略,以整车燃油经济性为目标,用改进型粒子群优化算法优化发动机联合工作曲线与发动机关闭曲线系数,仿真结果表明,相比于传统混合动力汽车,其燃油经济性提高了3.4%。模糊自适应控制策略结合自适应控制和模糊控制,可形成具自适应功能的模糊控制。白中浩等<sup>[15]</sup>采用自适应模糊控制策略对动力系统进行能量分配,仿真结果表明,该策略具有较强的鲁棒性,可使电机、发动机、蓄电池等动力设备处于最佳工作状态。文献[16-17]中以驾驶习惯、行驶工况和道路拥堵状况作为模糊逻辑控制器的输入量,设计模糊规则,对电机和发动机的转矩进行最佳分配,提高整车的燃油经济性。

基于模糊规则的能量控制策略不需建立精确的数学模型,具有较强的鲁棒性和适当的人类推理能力,基于嵌入式系统能够得到在线应用。但模糊规则主要依靠工程经验来制定,无法实现全局最优,为达到更好的控

制效果,需利用优化算法对HEV能量控制策略进一步优化。

## 2 基于优化的能量控制策略

HEV能量控制的本质是在一定约束条件下通过油耗与排放的最优控制实现HEV的最佳性能。将优化算法与能量控制相结合,提出了基于优化的能量控制策略。建立基于算法的优化模型,通过结合不同的约束条件和优化目标定义成本函数,利用优化算法对成本函数求最小解。基于优化的能量控制策略是当前理论研究的主体,分为全局优化和瞬时优化。

### 2.1 全局优化能量控制策略

全局优化能量控制策略是在已知车辆循环工况下,通过多个约束条件和优化目标构造成本函数,动态协调发动机和电动机的转矩分配,达到全局最佳运行点。全局优化控制由于其预览性质和计算复杂性而不能实车应用,但其是分析、评估和调整其他控制策略的良好工具。全局优化能量控制策略主要包括DP,SDP,GA和CP等,以DP最具代表性。

DP是一种求解优化多阶段决策过程,是解决HEV动力最优分配问题的全局优化方法。其将复杂问题转化为多级、单步优化问题,在获得全局最优解的同时,易处理问题的约束和非线性。DP是公认节油率最高的HEV能量控制方法,因此常被作为评价其他策略优劣性的标准。然而,DP存在“维数灾”且计算复杂。Kum等<sup>[18]</sup>利用DP获得油耗最小能量分配和换挡规律来改进逻辑门限控制策略,与原始能量控制策略相比,油耗显著下降。Gissing等<sup>[19]</sup>考虑发动机起停及频繁换挡对驾驶舒适性的影响,提出了修正目标函数的DP策略,仿真结果取得良好的控制效果。

为弥补工况无法完全已知的不足,Moura等<sup>[20]</sup>提出采用SDP来解决能量控制问题,Wegmann等<sup>[21]</sup>通过SDP提出了一种适用于系统实时控制的因果控制器,由此寻找最优解,以便在无限范围内最小化预期总成本。GA是一种启发式算法,具全局优化的特点,对非线性强的最优化问题具很好的适应性<sup>[22]</sup>。Yu等<sup>[23]</sup>针对插电式串联HEV,采用GA同时优化其动力系统部件参数及控制策略参数,仿真结果表明,相比于未优化效果,在保证动力性的前提下整车燃油经济性提高了8.97%,排放性也得到较大改善。但由于GA存在选择-交叉-变异的优化过程以及对种群个体和代数的要求,计算量大,易出现早熟陷入局部最优。

CP将复杂的非线性问题转化为半定问题,在保证优化结果有效性的同时极大减少运算时间,提高算法的实时性。Murgovski等<sup>[24]</sup>将发动机起动控制问题引入PHEV能量控制中,并将其合理简化为凸优化问题,采用CP方法实现电池大小、能量控制及发动机起停的综合优化,在较短计算时间内实现近似全局优化。

可见,全局优化能量控制策略能够实现特定循环工况下的全局最优控制,可获得最优理论燃油经济性。全局优化能量控制策略需提前知道循环工况,算法计算量大,对硬件的要求较高,实时性差。因此,无法将其直接应用于实车在线控制系统,但可作为评估其他控制策略优劣性的参考标准,对瞬时优化控制策略发展提供部分指导和借鉴意义。

### 2.2 瞬时优化能量控制策略

为克服全局优化算法需预知整个循环工况的不足,提出瞬时优化能量控制策略。瞬时优化能量控制策略的关键是构造瞬时优化中使用的成本函数并建立当前时刻能量消耗模型。瞬时优化基于发动机与电机/电池组的工作特性,利用每个时间步长内整车总能量或功率损耗最小原理对发动机与电机/电池组的功率或转矩进行合理分配,从而实现动力总成的瞬时能量分配<sup>[25]</sup>。该策略除考虑油耗外,还应保证电力的自我维持。瞬时优化能量控制策略计算量小、实时性高,能实现每一时间步长内的最优控制,但无法保证全局最优。典型的瞬时优化方法有PMP,ECMS和MPC。

PMP<sup>[26-28]</sup>是一种瞬时优化算法,通过求取每个时刻哈密顿函数的最小值获取最优控制变量,用于解决控制作用受约束的最优控制问题,同时给出优化问题取得最优解的必要条件,其能够对受约束的控制变量和目标函数泛函求极值。相对DP,PMP算法在满足全局最优的同时计算量更小,具实时应用的潜力,控制性能接近全局最优。但其在没有先验工况信息的前提下,无法获得最优协同状态,难以实现实时应用<sup>[29]</sup>。Xu等<sup>[30]</sup>采用PMP控制方法来降低插电式HEV的运行成本,且与DP,PMP等进行仿真比较分析,结果表明PMP具实时控制的优越性。秦大同等<sup>[31]</sup>提出近似极小值原理的实时控制策略,并将该策略和基于PMP控制进行对比,结

果表明,该策略优化效果接近PMP,计算时间短于PMP。

ECMS通过引入等效因子等效处理电耗与油耗,将电池消耗与发动机发电损耗转化为等效的发动机油耗,建立每一瞬时的总燃油消耗模型,通过加权因子对油耗、排放等进行多目标优化求解,且不用考虑电池SOC动态变化;再基于PMP进行推导分析,选取合适的等效系数,获得近似全局最优解,在提高实时性的同时对整车性能进行折中优化。该策略的实时性强,与动态规划相比,在满足全局最优的同时计算量更小<sup>[32]</sup>。

MPC具预测模型、参考轨迹、滚动优化和反馈校正4个特征<sup>[33]</sup>:以不同预测模型为基础,采用滚动优化原则,具有良好的实时性;基于参考轨迹增强其鲁棒性;通过反馈校正,提高系统抗干扰能力和控制精度,从而提升工况适应性和整车经济性。MPC的控制过程主要包括三个阶段:在有限时域内计算预测控制序列;将控制序列的第一个元素施加于被控对象;修正输出。但MPC策略实时在线滚动优化,运算量较大。针对这一问题,Beck等<sup>[34]</sup>将PMP引入到MPC的求解优化过程中,有效降低了MPC的运算复杂度。

综上,瞬时优化控制策略克服了全局优化计算复杂性和预知工况的约束,提高了HEV能量控制的实时性。基于PMP的能量控制策略能获得近似全局最优,与DP相比,其计算量小、实时性高,但需知先验工况信息。基于ECMS的能量控制策略不需预先知道先验工况信息,也不用考虑电池SOC值的动态变化,在提高实时性的同时对整车性能进行折中优化,但等效因子的选取直接影响优化控制效果。基于MPC的能量控制策略利用内部预测模型在线识别车辆当前状态参数,通过滚动优化预测周期内的局部优化模型获得最优控制解,具有良好的实时性。但预测时长的选取会影响控制结果的最优性和计算量大小,鲁棒性不强。

### 3 智能控制策略

智能控制策略是一种适用于比较复杂系统的控制策略,具自适应、自学习及自组织等优点,主要用于求解非线性和不确定性较强的复杂控制问题,主要包括基于神经网络控制、基于ITS和MA控制等。

#### 3.1 基于神经网络控制策略

基于神经网络控制策略对难以精确控制的非线性动态问题具超强的处理能力,不需了解预测问题的内部机理,只需大量样本集的输入输出,通过神经网络训练就能归纳整理出足够数量的隐含层神经元节点,建立能够模拟任意一复杂非线性映射问题的映射模型。基于神经网络控制策略在结构上一般分为输入层、隐含层和输出层,具很强的自适应性、鲁棒性和容错能力。

基于神经网络控制策略能有效克服动态规划算法运算速度慢等缺点,并能达到与其相近的运算效果<sup>[35]</sup>。席利贺等<sup>[36]</sup>将DP与误差反向传播(error back propagation, EBP)神经网络算法相结合,得到具有实时控制效果的神经网络控制模型,仿真结果表明,这种策略可大大降低总能量消耗,缩短充电时间,能有效改善传统控制策略计算复杂和实时性差的不足。为改善神经网络控制的全局性能,提高自适应性,陈可亮<sup>[37]</sup>提出模糊BP神经网络控制策略,与基于规则控制策略相比,模糊BP神经网络控制策略不仅降低了油耗和排放,还缩短了响应时间,提高了效率。孙超等<sup>[38-39]</sup>提出了基于径向基函数神经网络的短期车速预测器,以特定工况数据为学习样本,可模拟出一个近似高度非线性的输入输出关系,预测更加迅速准确,能量分配更加及时合理,利于提高整车燃油经济性。丁峰等<sup>[40]</sup>通过K均值聚类算法将工况分为平稳工况与快变工况两类,在快变工况下基于径向基神经网络预测车速,仿真结果验证了所提车速预测方法的准确性和有效性。

神经网络算法控制策略因其强大的信息处理能力、自组织与自学习功能,故能够对复杂非线性对象进行建模、计算、推理、控制,可大大改善HEV能量控制效果。但其需大量代表性的最优神经网络训练样本,以构建神经网络隐含层。

#### 3.2 基于智能交通系统的能量控制策略

自2008年Nature出版“Big Data”专刊<sup>[41]</sup>及2011年Science出版“Dealing with Data”专刊<sup>[42]</sup>以来,智能化交通管控、车辆运行系统状态监控与安全预警等核心关键技术取得了实质性进展<sup>[43]</sup>,对ITS的研究具重大意义<sup>[44]</sup>。ITS综合考虑人、车、路<sup>[45]</sup>,将先进的信息技术、数据通信传输技术、电子传感技术、控制技术及计算机技术等有效集成,建立一种大范围、全方位发挥作用的、实时准确高效的综合交通运输管理系统<sup>[43]</sup>。基于ITS提出了自适应巡航控制(adaptive cruise control, ACC)、融合交通数据的MPC控制和车联网(internet of vehicles, IOV)的HEV能量控制策略。

ACC主要是为解决驾驶员因疲劳驾驶的安全性和燃油经济性问题。ACC一般采用分层控制结构,由上层控制器和下层控制器组成。上层控制器主要通过ACC环境感知技术(雷达、导航和图像技术)获得当前车辆状态和本车与前车行驶状态(相对距离、相对速度、加速度),得出期望跟车加速度;下层控制器根据上层控制器得到的期望跟车加速度,通过能量优化控制策略对发动机/电机驱动或制动进行协调控制,自动调节节气门和制动系统,提高驾驶舒适性和安全性。

融合交通数据的MPC由ITS获得实时交通信息,对当前车速进行准确预测,在获得能量最优控制的同时,有效避免交通拥堵和突发情况造成的能量浪费,提高驾驶安全性和燃油经济性。余开江等<sup>[46]</sup>提出考虑交通信号灯的预测控制策略;Asadi等<sup>[47]</sup>提出采用车辆ACC系统,其可减少红灯停车的空闲时间和燃油消耗,结果证明所提方法可显著提升车辆的燃油经济性。Sun等<sup>[48]</sup>提出融合交通数据的能量预测控制框架,通过当前信息对电池SOC进行全局规划,结果表明该方法可获得与DP近似的燃油经济性;Yu等<sup>[49]</sup>利用ITS接收交通信号信息,应用MPC计算车辆最佳控制输入,结果表明,与典型驾驶员模型相比,提出的方法有效改善了燃油经济性。

IOV技术是汽车技术与互联网技术的高度融合<sup>[50]</sup>,通过集成多种通信技术将车辆内部各部件与外部世界连接成网络,形成融合车内网、车际网、车载移动互联网的一体化网络<sup>[51]</sup>,实现车与X(车、路、人、云等)智能信息交换、共享。IOV技术具备复杂环境感知、智能决策、协同控制等功能,可实现安全、高效、舒适、节能行驶<sup>[52]</sup>,是实现智能交通的重要途径,也是未来智慧城市的重要环节<sup>[53]</sup>。钱立军等<sup>[54]</sup>提出智能网联环境下的分层能量控制策略,上层控制器采用快速模型预测(fast model predictive control, FMPC)算法求取最优目标车速;下层控制器利用威兰斯线ECMS进行能量控制,进一步提升了整车性能。在IOV环境下,能更加合理地规划多车行走路径,可用于多车最优速度预测。由此,Homchaudhuri等<sup>[55]</sup>基于IOV技术,提出采用网联环境下多车经济性驾驶决策方法,实现混合动力车队的最优能量控制,提高总体燃油经济性。

上述分析表明:ITS较大推进了HEV控制策略的研究,其可进行车与车、车与环境之间信息的交流、共享,实现多车经济性驾驶决策,大大提高了车辆燃油经济性和安全性;ACC提高了驾驶舒适性和安全性;融合交通数据的MPC考虑交通密度、交通信号和坡道信息,可准确预测车速,更加合理地分配能量,提高整车燃油经济性;IOV技术实现车辆与外部环境之间的信息交换,其跨行业、跨领域问题突出,是一个复杂的系统工程。我国在IOV高端核心技术方面缺失,经验积累不足,目前IOV技术的实现较为困难,仍需进一步探索<sup>[56]</sup>。

### 3.3 基于多智能体控制策略

Minsky<sup>[57]</sup>最早提出智能体(Agent)概念,Agent能够自主感知环境并做出相应决策,且能与其他智能体进行交互、协调、协作。MAS是一个基于软件或硬件的计算机系统,具自治性、社会性、能动性、反应性等特征。其最大的特点是分布式自主决策和交互协作,兼具处理复杂环境的能力,效率高及动态性和可控性好。采用多智能体(multi-agent, MA)技术对复杂系统进行协调控制具较强的鲁棒性和实时性,研究证明MA思想符合HEV能量管理优化控制的特点和要求<sup>[58]</sup>。当赋予每一个Agent独立的能量控制子策略(即独立的知识、协调机制和目标),并通过各Agent之间交互、协调与协作,便能完成复杂系统的问题求解和控制。

牛礼民等<sup>[59-60]</sup>提出基于MAS的HEV能量控制策略,将发动机与电机之间的转矩分配看成单一智能体的自主感知、决策并与其他多个智能体之间交互、协调、协作的结果。由于HEV的动力总成系统包含发动机系统、电机系统、电池系统、和动力耦合系统,这些动力子系统在物理上和逻辑上相互独立,可将其抽象为发动机Agent、电机Agent、电池Agent和耦合器Agent,由此构成MAS协同控制框架,如图1。

以并联式混合动力汽车为原型,文献[59]中提

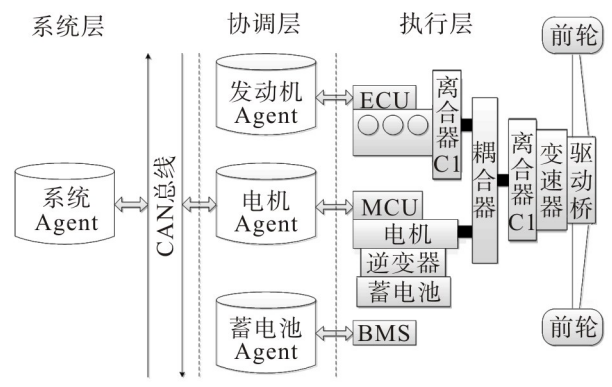


图1 HEV动力总成MAS体系结构

Fig. 1 MAS architecture of HEV powertrain

出一种多能源动力总成的多智能体协调控制策略,利用单智能体的智能行为和多智能体的协作能力解决车辆对复杂路况的自适应问题,仿真结果表明,在UDC(urban driving cycle)循环工况下,与电辅助策略相比,发动机燃油消耗率变化更平稳,峰值降幅为38.9%,说明发动机工作在高效区域,该控制策略正确有效。为提高HEV整车性能,文献[60]中结合ECMS模型,提出一种基于MAS集成控制策略,在NEDC(new european driving cycle)循环工况下的仿真结果表明,MAS集成控制策略下的发动机与电动机工作效率均比电辅助控制策略下的高,燃油经济性和排放性均比电辅助控制策略下的好。

MAS的最大特点是分布式自主决策和交互协作,MAS能量控制策略具有较强的鲁棒性和实时性,但其面临一些主要问题亟待解决,如MAS技术与现有HEV能量控制系统的兼容及技术融合等问题。

## 4 结论与展望

基于规则的能量控制策略最早用于实车,不需考虑优化问题,根据现有规则的控制效果、工程经验、专业知识不断完善改进规则,可进一步改善控制效果;基于优化的能量控制策略,采用离线优化在线查表的方法或通过进一步简化问题改进优化算法,减少计算量,可保证较高的控制精度和较好的实车应用能力,能量控制效果较好,但部分策略距实车应用还有一定差距;基于智能控制策略是利用人工智能、控制学等领域前沿知识,能量控制实时性和鲁棒性较高。在比较分析不同类型HEV控制策略的基础上,对HEV控制策略的研究与发展提出如下几点建议:

1) MAS<sup>[59-60]</sup>的引入为HEV能量控制策略研究提供了一种新的途径,以此为切入点,可将不同能量控制优化算法与MAS技术融合,形成不同HEV多智能体集成能量控制策略,通过分析不同测试工况下整车动力性、排放性、燃油经济性,得出最佳控制效果的能量控制策略。

2) HEV能量控制策略主要集中于对上层能量的协调分配,如基于规则的能量控制策略,根据发动机的MAP图控制其负荷区;基于优化的能量控制策略,主要是动态协调优化发动机和电动机的转矩分配;基于智能控制策略,主要是利用智能控制算法强大的信息处理能力增强能量控制的实时性和鲁棒性,但对底层传动系统,如发动机、电机、电池、变速箱考虑较少。然而,特别是在启停频繁的城市工况下,底层传动系统瞬态响应过程对动力性和排放性影响较大<sup>[61-62]</sup>。因此,满足车辆上层传动系统最优的同时实现车辆底层传动系统瞬态响应过程的均衡优化是一个值得研究的方向。

3) 单一的控制策略具不可避免的弊端<sup>[18-19,36-39]</sup>,如基于优化的DP可实现能量的全局最优分配,但难以在线应用;基于智能控制的神经网络处理信息能力强、实时性高,但优化性能受训练样本的影响。将不同优化控制算法相互协同、融合,取长补短,实现复合控制,以提高系统综合性能是研究的一个趋势,如将神经网络算法与DP相融合,在提高实时性的同时,可达到近似全局最优的控制效果。

4) 随着智能交通技术的快速发展,突破对单一车辆能量控制的局限,如ACC<sup>[47]</sup>、IOV<sup>[54-55]</sup>等多车经济性智能驾驶技术得以实现。目前多车经济性智能驾驶控制还处于初级阶段,对如何改进其控制效果、优化控制方法仍需进一步研究。另一方面,在智能交通系统下,建立启停、制动、加速、匀速等多工况预测模型<sup>[63]</sup>,考虑HEV动力性、燃油经济性、排放性、整车成本<sup>[64]</sup>,驾驶安全舒适性,辅助系统(空调、电加热座椅等)、动力混合度(电机与发动机的规格、提供的功率比)、电池寿命对充放电的影响,实现多目标多工况预测控制的优化协调是未来汽车控制的一个关键技术,仍需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 于秀敏,曹珊,李君,等.混合动力汽车控制策略的研究现状及其发展趋势[J].机械工程学报,2006,42(11):10-16.
- [2] 赵秀春,郭戈.混合动力电动汽车能量管理策略研究综述[J].自动化学报,2016,42(3):321-334.
- [3] DI C S, WEI L, KOLMANOVSKY I V, et al. Power smoothing energy management and its application to a series hybrid powertrain[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6):2091-2103
- [4] 牛礼民,杨洪源,周亚洲.并联式混合动力汽车能量管理策略新分类与概述[J].机电工程,2017,34(4):321-329.
- [5] WANG H, HUANG Y J, HE H W, et al. Energy management of hybrid electric vehicles[M]//Modeling, Dynamics and Control of Electrified Vehicles. Amsterdam: Elsevier, 2018:159-206.
- [6] 舒红,秦大同,胡建军.混合动力汽车控制策略研究现状及发展趋势[J].重庆大学学报(自然科学版),2001(6):28-31.

- [7] 苑昆, 靳添絮, 刘立, 等. 混合动力地下铲运机功率跟随控制策略[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16):105-111.
- [8] SCHOUTEN N J, SALMAN M A, KHEIR N A, et al. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2002, 10(3):460-468.
- [9] ZENG Q, HUANG J. The design and simulation of fuzzy logic controller for parallel hybrid electric vehicles[C]// IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, 2007:908-912.
- [10] MORTEZA M, MEHDI M. Optimized predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicle based on traffic condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139:935-948.
- [11] 马良, 冯国胜, 牛晓燕, 等. 基于模糊控制的并联混合动力汽车能量控制策略研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2016, 29(3):76-80.
- [12] 陈瑞增. 基于模糊控制并联混合动力汽车能量管理策略的优化研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019:21-32.
- [13] 彭涛, 陈全世. 并联混合动力电动汽车的模糊能量管理策略[J]. 中国机械工程, 2003(9):83-86.
- [14] 邓涛, 卢任之, 李亚南, 等. 基于LVQ工况识别的混合动力汽车自适应能量管理控制策略[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3):420-425.
- [15] 白中浩, 王耀南, 曹立波. 混合动力电动汽车能量自适应模糊控制研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(4):389-391.
- [16] 秦大同, 杨官龙, 胡明辉, 等. 基于驾驶意图的插电式混合动力汽车能量管理策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(6):1743-1750.
- [17] WU J, ZHANG C H, CUI N X. Fuzzy energy management strategy for a hybrid electric vehicle based on driving cycle recognition[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(7):1159-1167.
- [18] KUM D, PENG H, BUCKNOR N K. Supervisory control of parallel hybrid electric vehicles for fuel and emission reduction[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2011, 133(6):061010.
- [19] GISSING J, THEMANN P, BALTZER S, et al. Optimal control of series plug-in hybrid electric vehicles considering the cabin heat demand[J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2016, 24(3):1126-1133.
- [20] MOURA S J, FATHY H K, CALLAWAY D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2011, 19(3):545-555.
- [21] WEGMANN R, DOEGE V, BECKER J, et al. Optimized operation of hybrid battery systems for electric vehicles using deterministic and stochastic dynamic programming[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14(1):22-38.
- [22] LÜ X, WU Y, LIAN J, et al. Energy management of hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205:112474.
- [23] ZHANG Y, MENT D W, ZHOU M L, et al. Management strategy based on genetic algorithm optimization for PHEV[J]. International Journal of Control and Automation, 2014, 7(11):399-408.
- [24] MURGOVSKI N, JOHANNESSON L, SJOBERG J, et al. Engine on/off control for dimensioning hybrid electric powertrains via convex optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7):2949-2962.
- [25] LEI Z, QIN D, ZHAO P, et al. A real-time blended energy management strategy of plug-in hybrid electric vehicles considering driving conditions[J]. Elsevier Ltd, 2020, 252:119735.
- [26] WANG Y, WU Z, CHEN Y, et al. Research on energy optimization control strategy of the hybrid electric vehicle based on Pontryagin's minimum principle[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 72:203-213.
- [27] ZHANG S, HU X, XIE S, et al. Adaptively coordinated optimization of battery aging and energy management in plug-in hybrid electric buses[J]. Applied Energy, 2019, 256:113891.
- [28] LIU Y, LIU J, QIN D, et al. Online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles based on rule learning[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260:121017.
- [29] 张风奇, 胡晓松, 许康辉, 等. 混合动力汽车模型预测能量管理研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10):86-108.
- [30] XU L, OUYANG M, LI J, et al. Application of pontryagin's minimal principle to the energy management strategy of plugin fuel cell electric vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(24):10104-10115.
- [31] 秦大同, 曾育平, 苏岭, 等. 基于近似极小值原理的插电式混合动力汽车实时控制策略[J]. 机械工程学报, 2015, 51(2):134-140.
- [32] 王钦普, 游思雄, 李亮, 等. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16):1-19.
- [33] 张洁丽. 基于模型预测控制的插电式混合动力客车能量管理策略研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016:48-51.
- [34] BECK R, BOLLING A, ABEL D, et al. Comparison of two real-time predictive strategies for the optimal energy management of a hybrid electric vehicle[J]. Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies Nouvelles, 2007, 62(4):635-643.
- [35] 曾小华, 王星琦, 宋大风, 等. 考虑电池寿命的插电式混合动力汽车能量管理优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(11):

- 2206-2214.
- [36] 席利贺,张欣,吴建政,等. 基于动态规划与神经网络的增程式电动汽车能量管理策略研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9): 128-136.
- [37] 陈可亮. 并联式混合动力电动汽车能量管理系统智能控制策略研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011:32-50.
- [38] SUN C, HU X, MOURA S J, et al. Velocity predictors for predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(3):1197-1204.
- [39] 孙超. 混合动力汽车预测能量管理研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016:25-50.
- [40] 丁峰,王伟达,项昌乐,等. 基于行驶工况分类的混合动力车辆速度预测方法与能量管理策略[J]. 汽车工程, 2017, 39(11): 1223-1231.
- [41] FRANKEL F, REID R. Big data: distilling meaning from data[J]. Nature, 2008, 455(7209):30.
- [42] LOS W, WOOD J. Dealing with data: upgrading infrastructure[J]. Science, 2011, 331(6024):1515-1516.
- [43] 金茂菁. 我国智能交通系统技术发展现状及展望[J]. 交通信息与安全, 2012, 30(5):1-5.
- [44] 陆化普,孙智源,屈闻聪. 大数据及其在城市智能交通系统中的应用综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(5):45-52.
- [45] 赵娜,袁家斌,徐晗. 智能交通系统综述[J]. 计算机科学, 2014, 41(11):7-11.
- [46] 余开江,许孝卓,胡治国,等. 基于交通信号灯信息的混合动力汽车节能预测控制方法[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(5): 480-486.
- [47] ASADI B, VAHIDI A. Predictive cruise control: utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time[J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2011, 19(3):707-714.
- [48] SUN C, MOURA S J, HU X, et al. Dynamic traffic feedback data enabled energy management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2015, 23(3):1075-1086.
- [49] YU K J, YANG J Q, YAMAGUCHI D. Model predictive control for hybrid vehicle ecological driving using traffic signal and road slope information[J]. Control Theory and Technology, 2015, 13(1):17-28.
- [50] LINGLING H, HAIFENG L, XU X, et al. An intelligent vehicle monitoring system based on internet of things[C]//Computational Intelligence and Security. Hainan, 2011: 231-233.
- [51] 谢伯元,李克强,王建强,等. “三网融合”的车联网概念及其在汽车工业中的应用[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(4):348-355.
- [52] 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, 2016:112-302.
- [53] 蔺宏良,黄晓鹏. 车联网技术研究综述[J]. 机电工程, 2014, 31(9):1235-1238.
- [54] 钱立军,邱利宏,司远,等. 智能网联环境下的混合动力汽车分层能量管理[J]. 汽车工程, 2017, 39(6):621-629.
- [55] HOMCHAUDHURI B, VAHIDI A, PISU P. Fast model predictive control-based fuel efficient control strategy for a group of connected vehicles in urban road conditions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(2):760-767.
- [56] 刘宗巍,匡旭,赵福全. 中国车联网产业发展现状、瓶颈及应对策略[J]. 科技管理研究, 2016, 36(4):121-127.
- [57] MINSKY M. The Society of Mind[M]. New York: Simon and Schuster, Inc, 1986:110-231.
- [58] 牛礼民. 一种混合动力汽车动力总成智能控制系统:CN103661355A[P]. 2016-05-08.
- [59] 牛礼民,叶李军,阮晓东. 混合动力汽车多能源动力总成的智能体控制技术[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(8):1108-1113.
- [60] 张泉泉,牛礼民,牛奋田,等. 增程式电动汽车的智能体组网及推理技术[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 344-351.
- [61] JOHRI R, BASELEY S, FILIPI Z. Simultaneous optimization of supervisory control and gear shift logic for a parallel hydraulic hybrid refuse truck using stochastic dynamic programming[C]// Proc ASME Dyn Syst Control Conf. Arlington, TX, USA, 2011: 99-106.
- [62] SERRAO L, ONORI S, SCIARRETTA A, et al. Optimal energy management of hybrid electric vehicles including battery aging [C]// Proceedings of the American Control Conference. San Francisco, CA, 2011:2125-2130.
- [63] 陈虹,宫洵,胡云峰,等. 汽车控制的研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(4):322-346.
- [64] 张松,吴光强,郑松林. 插电式混合动力汽车能量管理策略多目标优化[J]. 同济大学学报, 2011, 39(7):1035-1039.