

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.001

# 并联式混合动力汽车能量管理策略新分类与概述\*

牛礼民, 杨洪源, 周亚洲

(安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:**针对混合动力汽车 (hybrid electric vehicle, HEV) 能量管理策略的分类与综述问题, 对并联式 HEV 能量管理策略的研究现状与发展趋势进行了研究。根据能量管理策略是否使用人工智能控制方式或优化算法, 对并联式 HEV 能量管理策略进行了横向分类和综述, 纵向梳理了模糊逻辑、神经网络、动态规划与等效油耗最小原理的具体应用方式, 分析了多智能体系统应用于 HEV 能量管理优化控制的可行性和优势。研究结果表明, 智能优化控制型能量管理策略是解决 HEV 量管理问题的有效途径, 而智能优化控制方法和驾驶工况预测技术的有机结合是未来的一个重要研究方向; 另外, 将多智能体技术应用于 HEV 能量管理优化控制也是一个值得研究的方向。

**关键词:** 能量管理; 并联式混合动力汽车; 智能优化控制; 多智能体系统

中图分类号: TP273; U469

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)04-0321-09

## Novel classification and review on energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles

NIU Li-min, YANG Hong-yuan, ZHOU Ya-zhou

(College of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** Aiming at the classification and summarization of energy management strategy of hybrid electric vehicle, the research status and development trend of energy management strategy for parallel hybrid electric vehicle were studied. State-of-the-art energy management strategies for parallel hybrid electric vehicles were reviewed and reclassified based on the fact that whether an artificial intelligence control methods or an optimization algorithms was used by the control strategy. The specific applications of fuzzy logic, neural network, dynamic programming and Equivalent consumption minimization strategy were also summarized lengthways. Besides, the feasibility and advantages of energy management strategy based on multi-agent system were discussed. The results indicate that the intelligent optimal control strategy is an effective way to solve the HEV energy management problem, and the combination of the intelligent control algorithm and driving condition prediction technology is an important research direction in the future; In addition, the MAS technology that is applied to HEV energy management optimization is also a direction worthy of studying.

**Key words:** energy management; parallel hybrid electric vehicle; intelligent optimized control; multi-agent system

## 0 引 言

混合动力汽车是在传统汽车的基础上配备了电

机/电池驱动系统的新能源汽车, 是介于传统汽车与纯电动汽车之间的一种过渡车型<sup>[1]</sup>。能量管理系统是 HEV 的支撑技术, 其主要负责在满足驾驶需求的情况下, 优化并控制发动机、电机与电池之间的动力匹配和

收稿日期: 2016-10-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51275002); 安徽工业大学研究生创新研究基金资助项目 (2014058); 江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室项目 (BM20082061502)

**作者简介:** 牛礼民 (1976-), 男, 安徽肥东人, 博士后, 副教授, 主要从事车辆动态性能模拟和电动汽车控制技术方面的研究. E-mail: niulimin@ahut.edu.cn

输出,其优劣性直接影响着整车动力性、排放性、燃油经济性与驾驶舒适性。自 1997 年至 2015 年底,跨学科、跨领域的控制理论和优化算法不断被应用到 HEV 能量管理问题的求解过程,能量管理策略层出不穷,具有代表性的能量管理策略包括逻辑门限能量管理策略、模糊逻辑能量管理策略、神经网络能量管理策略、动态规划能量管理策略和等效油耗最小能量管理策略等。目前,国内外研究同行都趋于将 HEV 能量管理策略分成基于优化和基于规则两大类<sup>[2-6]</sup>,这种分类方法的好处是几乎能够囊括所有主流控制思想,结构清晰,层次分明,易于整体把握,但无法凸显 HEV 能量管理策略由规则型控制策略往智能优化控制型能量管理策略的发展方向。因此,根据能量管理策略是否使用人工智能控制方式或优化算法对并联式 HEV 能量管理策略进行横向梳理与分类,把握其智能优化控制发展脉络是迫切而必要的。

本研究首先根据能量管理策略是否使用人工智能或优化算法,对能量管理策略做横向分类与概括,并对模糊逻辑、神经网络、动态规划与等效油耗最小原理的

具体应用方式做纵向梳理,然后简要介绍多智能体系统的概念,分析将多智能体思想应用于 HEV 能量管理优化控制的可行性和优势。

## 1 规则与优化

控制科学与技术目前正处于智能控制发展时期,并逐渐向智能优化控制方向演变<sup>[7]</sup>。智能优化控制是在对复杂系统进行智能控制的基础上采用优化算法对控制器进行局部或全局的优化求解。辛斌<sup>[8]</sup>认为 Saridis 提出的三元论(人工智能、控制学与优化学的交集)的本质就是智能优化控制。考虑到串联式、并联式和混联式 HEV 能量管理策略发展概况的差异,本研究仅以并联式 HEV 能量管理策略为研究对象。为进一步概括梳理并联 HEV 能量管理策略的发展历程,把握其智能优化控制发展脉络,根据 HEV 能量管理策略是否使用人工智能控制方式或优化算法,可将并联式 HEV 能量管理策略分成规则明确型、优化型、智能型与智能优化型 4 类能量管理策略,分类示意图如图 1 所示。文中常见缩写词解释如表 1 所示。

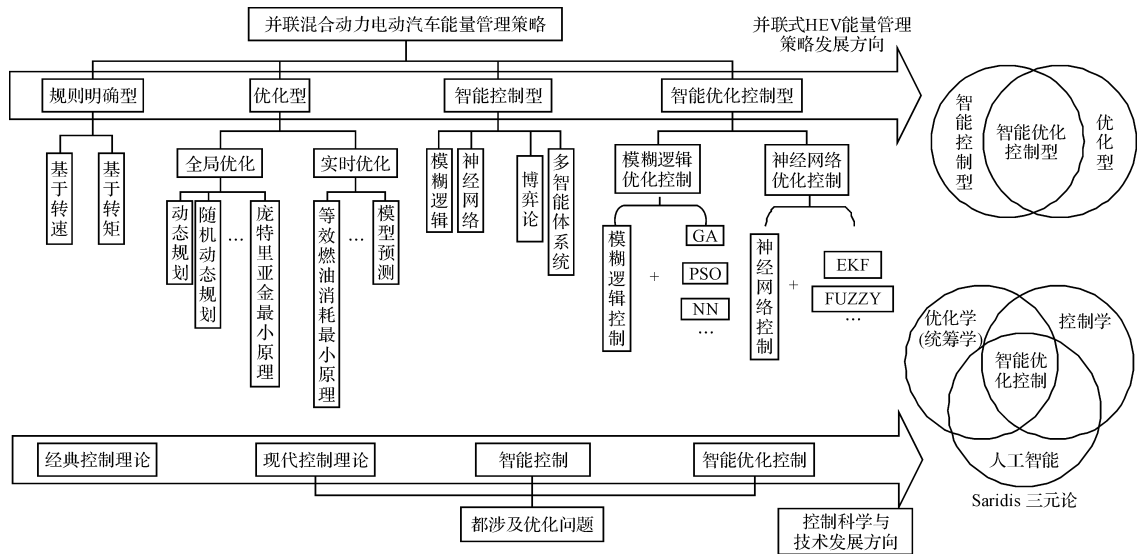


图 1 并联式 HEV 能量管理策略的分类

表 1 文中常见缩略词

缩写词	英文全称	中文含义
SOC	State of Charge	荷电状态
MAS	Multi-Agent System	多智能体系统
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy	等效油耗最小策略
DDP	Deterministic Dynamic Programming	确定性动态规划
SDP	Stochastic Dynamic Programming	随机动态规划
PMP	Pontryagin's Minimum Principle	庞特里亚金最小值原理
MPC	Model Predictive Control	模型预测控制
NN	Neural Network	神经网络
FNN	Fuzzy Neural Network	模糊神经网络
GA	Genetic Algorithm	遗传算法
PSO	Particle Swarm Optimization	粒子群优化算法

## 1.1 规则明确型能量管理策略

该策略的基础是利用电机/电池协调输出来优化发动机工作特性,其关键在于如何划分发动机的运行区间(需要综合考虑工程经验和发动机的工作特性),以及如何设计具体规则来判断当前行驶环境下对应的运行区间。规则是根据整车动力性指标,通过道路负载、加速踏板信号、制动踏板信号、电池 SOC 值等变量来判断发动机的工作区域,并计算电机/电池的协调输出功率值,以便达到节能减排的效果。规则明确型能量管理策略可细分为基于车速和基于转矩两类。

本研究以车速为控制变量,若实时车速低于设定阈值,汽车进入纯电动驱动模式;若实时车速高于设定阈值,汽车切换到发动机单独驱动模式;若汽车需要急加速或高速爬坡,则切换到发动机和电机联合驱动模式。此类能量管理策略规则简单,常见于研究初期阶段,具有较为广泛的应用价值。但以车速作为单一控制变量无法保证发动机工作在高效区域,会出现当车辆进入高速巡航时仅由发动机提供驱动力的不合理情况,因此目前大多数的控制策略都是基于转矩的。以转矩作为控制变量能够更加合理地划分发动机工作区域,可以有效避免汽车在高速低负荷条件下由发动机单独驱动的情况。例如文献[9]描述了基线能量管理策略(baseline control strategy, BCS),当电池 SOC 值较低时,电机对电池充电。基线能量管理策略能够降低油耗,维持电池 SOC 平衡,被广泛应用于并联 HEV,高级车辆仿真软件 ADVISOR 根据其控制思想设计了并联式电力辅助能量管理策略(parallel electric assist control strategy)。为了进一步提高控制策略的燃油经济性并降低排放,研究人员常常利用 PSO<sup>[10]</sup> 或 GA<sup>[11]</sup> 等优化算法对能量管理策略的控制参数进行优化与调整。

规则明确型能量管理策略主要依靠发动机运行区间的划分和规则的制定,思路清晰,技术门槛低,易于实现,但能量管理策略的工况适应性不强,无法最大化 HEV 节能减排的潜力。为寻找 HEV 能量管理问题的最优解和更优异的工况自适应性,学术界逐渐将目光转向优化型 HEV 能量管理策略。

## 1.2 优化型能量管理策略

HEV 能量管理的本质是复杂非线性时变系统的能量优化控制问题,优化型能量管理策略的关键是建立并求解基于某种优化算法的优化模型,具体地,结合不同的约束条件和优化目标来定义能量成本函数,并利用优化算法对优化目标进行最小化求解运算。目

前,优化型能量管理策略包括基于已知整个循环工况的全局优化能量管理策略和基于车辆实时状态的瞬时优化能量管理策略。

### 1.2.1 全局优化能量管理策略

动态规划是一种求解优化决策问题的方法,它将复杂优化问题转化为多级、单步的优化选择问题<sup>[12]</sup>。动态规划可实现特定循环工况下的全局优化,最大程度地挖掘 HEV 节能的潜力,是公认最为理想的 HEV 稳态过程能量管理全局优化算法。但动态规划需要预知循环工况,计算量大,而且存在“维数灾”,实时性不强,因此无法直接用于实车在线控制。纵向梳理的 DP 算法的具体应用方式如表 2 所示。

表 2 DP 算法的具体应用方式

序号	应用方式	文献
1	DDP 算法	文献[13]
2	优化驾驶路线	文献[14]
3	作为评价策略优劣性的参考标准	文献[15]
4	作为制定控制规则的依据	文献[16]
5	作为神经网络控制器的训练样本	文献[36]
6	提高动态规划计算效率	文献[18]
7	解决 DP 需要预知循环工况问题	文献[20]

文献[13]将并联式 HEV 能量管理问题描述为具有某种约束条件的能量成本函数,建立以发动机油耗为约束条件和以油耗与排放为约束条件的两种优化模型,分别采用 DDP 进行反推动态求解,证明了 DDP 的有效性,并指出 DDP 计算量大,需要预先知道整个循环工况,无法进行实车实时控制。考虑到 DDP 需要提前知道循环工况信息,所以研究人员将其应用于优化驾驶路线固定的车辆,如文献[14]设计了基于 DDP 的 HEV 通勤路线能量管理系统,应用 DDP 对通勤路线预先计算最优控制解,然后以查表的形式进行转矩分配。由于 DDP 是公认节油率最高的 HEV 能量管理方法,常常被作为评价其他策略优劣性的标准。虽然 DDP 不能直接用于实车控制,但是从 DDP 求得的全局最优控制解中提炼规律,用来指导设定规则明确型能量管理策略或模糊逻辑能量管理策略的控制规则,也能提高控制效果。文献[16-17]对中国典型城市公交循环工况进行了 DDP 全局优化仿真,分析不同电池初始 SOC 下燃料电池输出功率随需求功率变化的规律,以此为基础设计了模糊逻辑能量管理策略。

DDP 存在需要预知整个循环工况、计算量大、“维数灾”和实时性差的问题,许多研究人员为解决这些问题做了大量的相关性研究,促进了 DDP 的发展。针对如何提高动态规划计算效率的问题,文献[18]通过减少 DDP 离散化产生的网格点数和变量的维数的来

简化 DDP,有效减少了仿真时长。针对如何解决 DDP 需要预知循环工况的问题,主要有两种方法:①结合工况识别预测技术。例如文献[19]利用 GPS 对车辆运行状态进行预测,并将其与 DDP 结合,得到了 HEV 实时在线滚动优化能量管理策略。②随机动态规划。考虑到马尔可夫链可以预测循环工况,将马尔可夫链嵌套在 DDP 算法中便形成了 SPD 算法,克服了 DDP 对行驶工况的依赖性。文献[20]则在维持电池容量的基础上,以燃油消耗最小为目标,通过 SPD 过程获得能量管理策略,并在线实施,仿真实验表明其燃油经济性略逊于 DDP,但避免了电池过冲和深度放电。

20 世纪 50 年代 Pontryagin 等提出了庞特里亚金最小原理,其能够对受约束的控制变量和目标函数泛函求极值,适用于求取 HEV 能量管理问题的全局最优控制解。PMP 算法比 DDP 的计算量更少,因而具有更好的实时性,是典型的全局优化方法。文献[21-22]运用数学方法推导出关于 PMP 算法的 HEV 能量管理数学模型,并在 Matlab/Simulink 中建模并仿真,与 DDP 相比,其燃油经济性略低 0.07%,但计算量小,实时性更好。文献[23]将 ECMS 算法嵌套在 PMP 算法中,采用比例积分反馈控制对等效因子进行在线调节,使得 PMP 算法摆脱需要预先知道循环工况的束缚,实现了并联式 HEV 的实时控制。

全局优化能量管理策略最大的优点是能够实现特定循环工况下的全局最优控制,获得了最好的理论燃油经济性,但由于它需要提前知道循环工况,实时性差,研究人员无法将其直接应用到实车在线控制系统,为寻找实时性更好的策略,学术界开始将目光投向瞬时优化能量管理策略。

### 1.2.2 瞬时优化能量管理策略

瞬时优化考虑发动机与电机/电池组的工作特性,利用每个时间步长内整车的总能量或者功率损耗最小原理对发动机与电机/电池组的功率或者转矩进行合理分配。瞬时优化能量管理策略的关键是建立当前时刻的能量消耗模型,与全局优化能量管理策略相比,它不需要预先知道整个循环工况,计算量小,实时性更高,但无法保证全局最优。典型的瞬时优化方法包括基于等效油耗最小 ECMS 的能量管理策略和基于模型预测 MPC 的能量管理策略。

#### (1) 基于 ECMS

该能量管理策略通过引入等效因子将电机的消耗电量转换成等效的发动机油耗,从而建立每一瞬时的总燃油消耗模型,也可以在总燃油消耗模型中引入加权因子对排放进行折中考虑。目前,常用的电机等效

油耗模型包括基于 SOC 变化量的等效油耗模型和基于工作效率的等效油耗模型。Paganelli 等人<sup>[24]</sup>建立了基于工作效率的等效油耗模型,其根据发动机、电机与电池的平均工作效率以及当前时间步长的实时工作效率来计算在电池充电或者电池放电情况下的电机等效油耗。Johnson 等人依据发动机燃油消耗、电机扭矩和 SOC 变化量三者的关系来推导出对应与电机扭矩的等效油耗,并考虑电池的充放电损失和制动再生电能的影响,建立了基于 SOC 变化量的等效油耗模型,其具体应用方式如表 3 所示。

表 3 ECMS 算法的具体应用方式

序号	应用方式或发展方向	文献
1	基于 ECMS 的自适应能量管理策略	文献[25]
2	作为神经网络控制器的训练样本	文献[35]
3	等效因子自适应于驾驶工况	文献[26]
4	充电和放电过程采用不同的等效因子	文献[27]

ECMS 算法的优点在于计算量相对 DDP 小,不需预先知晓循环工况,方便折中考虑油耗和排放,易于对能量管理进行实时控制,因而具有较好应用前景。文献[25]将 ECMS 算法与逻辑门限策略相结合,形成自适应能量管理策略,它不仅能缩短仿真时间、维持电池 SOC 稳定,还能够有效地改善车辆的燃油经济性和排放性。文献[26]通过离线方法求得对应不同循环工况的等效因子,根据识别的循环工况动态选用相对应的等效因子,从而实现等效因子对工况的自适应。文献[27]考虑充电和放电过程的差异,分别采用不同的等效因子求电机等效油耗。

#### (2) 基于模型预测

该能量管理策略利用内部预测模型在线识别车辆当前状态参数,通过滚动优化在预测周期内的局部优化模型而获得实时最优控制解,计算量小,可用于实时控制,但算法鲁棒性不强。例如文献[28]利用 MPC 算法将 DDP 转化为求解有限时域最优问题,首先建立马尔可夫需求功率预测模型,并将 MPC 算法与 DDP 结合,然后以油耗最小为目标进行滚动优化控制。文献[29]建立基于油门踏板位置的需求转矩预测模型,并将复杂的非线性转矩分配问题转化为线性优化规划问题(为了减少计算量),以等效油耗最小为优化目标,通过滚动优化求解,完成对转矩分配的模型预测控制。

瞬时优化算法摆脱了全局优化算法需要提前知道整个循环工况的制约,计算量小,实时性更高,能实现每一瞬时的最优控制,但无法保证全局最优。为了在兼顾瞬时或全局最优的同时不降低实时性,将瞬时或

全局优化算法嵌套在人工智能控制方法的智能控制型能量管理策略得到了广泛研究。

## 2 智能与智能优化

### 2.1 智能控制型能量管理策略

智能控制是人工智能与自动控制的交集,主要用于求解非线性和不确定性较强的复杂控制问题,因此也适用于 HEV 能量管理系统。智能控制型能量管理策略将瞬时优化和全局优化算法嵌套在人工智能控制框架中,可以达到优化算法近似的控制效果;另外,人工智能控制算法强大的信息处理能力也保证了较好的实时性。

#### (1) 基于模糊逻辑控制

模糊逻辑是一种基于模糊推理的非线性控制方法,可以简化非线性时变系统的复杂控制问题。早期的模糊逻辑能量管理策略常以电池 SOC、整车需求转矩、车速等状态变量作为模糊控制器的输入,通过模糊推理过程来对 HEV 的工作模式和功率进行划分,实现 HEV 能量流的合理控制<sup>[30]</sup>。随着工况识别与预测技术的发展,驾驶员的驾驶习惯和驾驶工况也被用来制定模糊规则<sup>[31-32]</sup>,其优点是计及驾驶状态对油耗、电池 SOC 与功率分配的影响。模糊逻辑能量管理策略的优点是不需要建立精确的系统模型,具有较强的鲁棒性和适当的人类推理能力,计算速度快,能够基于嵌入式系统得到在线应用。但其本质是基于模糊规则的能量管理策略,其模糊规则主要依靠工程经验来制定,无法实现全局最优,为了达到更好的控制效果,需要利用优化算法对模糊逻辑能量管理策略的参数进行优化,具体应用方式如表 4 所示。

表 4 模糊逻辑的应用方式

序号	应用方式	文献
1	模糊逻辑能量管理策略	文献[30]
2	形成模糊逻辑优化型能量管理策略	文献[40]
3	形成模糊神经网络能量管理策略	文献[46]

#### (2) 基于神经网络控制

神经网络是模拟生物神经系统结构及其学习、推理、记忆机制的数学计算模型,可分布并行处理信息,并能无限逼近非线性函数,适用于难以建模的非线性系统,因此也适用于 HEV 能量管理。虽然优化型能量管理策略(如 DDP、ECMS 算法)能够求得最优控制解,但实时性不强等因素限制了其在实车控制系统中的推广和应用。神经网络与工况识别技术的结合能够等效模拟优化型能量管理策略的优化控制解,间接实现了 HEV 能量管理的优化控制,而神经网络较强的分布并

行处理信息能力为神经网络能量管理策略在实车控制系统中的应用提供了可能,其具体应用方式如表 5 所示。

表 5 神经网络的具体应用方式

序号	应用方式	文献
1	模拟 ECMS 算法最优控制解	文献[33]
2	模拟 DDP 最优控制解	文献[37]
3	形成神经网络优化型能量管理策略	文献[44]

由于模拟 ECMS 算法最优控制解的神经网络能量管理策略同时具备了 ECMS 算法和神经网络的优点,具有较好的实时性与控制效果。这类神经网络能量管理策略的出发点是等效模拟 ECMS 算法的瞬时优化控制效果,同时解决 ECMS 算法因计算量大而无法实现实车实时控制的问题。文献[33-34]分别采用了不同类型的神经网络来模拟 ECMS 算法的能量管理控制效果,与 ECMS 算法相比,在 NEDC、UDDS 和 JA1015 工况下其燃油经济性略有下降,偏差不到 2%,说明神经网络能较好地复现 ECMS 算法的控制效果;实时性有了显著提高,约 97%。为了模拟 DDP 的控制效果,部分学者利用 DDP 结合多种标准工况离线仿真得到的能量全局最优控制解集作为神经网络的训练样本,并结合循环工况识别与预测技术建立神经网络能量管理策略<sup>[35-36]</sup>,其中文献[36]在 NY\_City 循环工况下对控制策略进行仿真,与 DDP 相比其油耗为 123.35 g,增加了 14.51 g,偏差 13.33%;电池 SOC 终值为 0.488 1,下降 0.011 9,偏差为 2.38%,说明神经网络能量管理策略能够很好地模拟 DDP 的控制效果,但文献没有给出两种能量管理策略的运算时间对比,故无法知晓它们的实时性差异。

#### (3) 基于博弈论控制

博弈论(game theory, GT)是研究博弈行为的数学理论和方法,广泛应用于生物学、经济学、计算机科学、军事战略等学科。基于 GT 的 HEV 能量管理策略把发动机和电机看成游戏的参与者,将整车功率流控制看成参与者之间的合作博弈行为。目前,将 GT 应用到并联式 HEV 能量管理的报道尚不多见,比较有代表性的是英国学者 Dextreit 等人<sup>[37]</sup>的相关研究——GT 算法把并联式 HEV 能量管理问题看成以行车状态(车速和车轮扭矩)和整车动力系统作为两个局中人的非合作博弈,成本函数以权重的形式综合考虑发动机油耗、NOx 排放、电池 SOC 与设定值的偏差、车速与期望车速的偏差以及车轮扭矩与期望扭矩的偏差,在有限时域内采用 Stackelberg 反馈均衡求解博弈问题,进而得到基于 GT 的能量管理策略,在 Matlab 中进行

离线仿真,与 DDP 相比,其仿真时长增加了 6 倍,油耗为 5.46 L/100 km,增加了 0.11 L/100 km,偏差为 2%。

#### (4) 基于多智能体控制

智能体 (Agent) 是一个能自主感知环境并能自主决策的计算实体,多个 Agent 的组合构成了多智能体系统。基于多智能体的 HEV 能量管理策略将发动机与电机之间的转矩分配问题看成是单一智能体自主决策和多个智能体交互、协作与协调的行为,通过多智能体系统协同控制框架对其进行控制。文献[38]针对 ISG 型并联式 HEV,设计了基于多智能体的 HEV 能量管理策略:构建由发动机 Agent、耦合器 Agent、电动机 Agent、电池 Agent、系统 Agent 组成的多智能体系统,基于多智能体的 HEV 能量管理策略如图 3 所示。各子 Agent 对工况感知并自主决策,再由系统 Agent 总体协调来适应当前工况的转矩分配,Cruise 仿真结果表明,在 UDC 循环工况下,与电辅助策相比,其发动机燃油消耗率变化更加平稳,峰值降幅为 38.9%,但累计耗油量(发动机油耗和电机等效油耗之和)增加了 8.3%,说明所设计的能量管理策略以牺牲较小的电机工作效率为代价换取发动机工作在高效区域的控制效果,控制思路是正确而有效的。

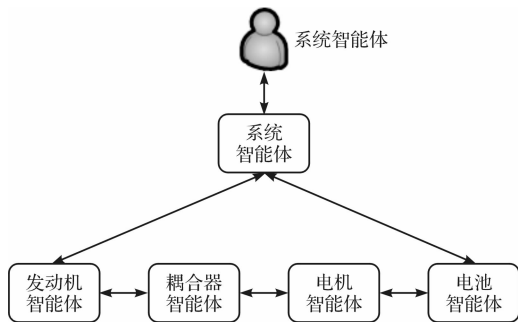


图 3 基于多智能体的 HEV 能量管理策略

## 2.2 智能优化控制型能量管理策略

进一步优化智能控制型能量管理策略的控制参数能获得更好的控制效果,它是能量管理策略设计过程的重要环节。智能优化控制型能量管理策略是既使用了人工智能控制方法,又采用了优化算法对人工智能控制器进行参数优化的控制策略,主要包括模糊逻辑优化型和模糊神经网络优化型两类能量管理策略。

#### (1) 模糊逻辑优化型

模糊逻辑能量管理策略具有较强的鲁棒性和适当的人类推理能力,计算速度快,能够基于嵌入式系统得到在线应用。但其本质是基于规则的能量管理策略,其模糊规则主要依靠工程经验来制定,无法实现全局最优,为了达到更好的控制效果,需要优化模糊逻辑控

制器的隶属度函数或模糊控制集,常用的优化算法包括 GA 和 PSO。由于 GA 的全局搜索能力强、鲁棒性好,适用于求离散、非线性问题的最优解,它是用于优化模糊逻辑最广泛的方法。文献[39]在 10 次 UDDC 循环工况下,以发动机燃油消耗为适度函数,采用 GA 优化模糊逻辑能量管理策略的隶属度函数,与未优化的模糊逻辑能量管理策略相比,其油耗有所上升但系统效率明显提高。文献[40]同时考虑燃油经济性和排放性,采用性能更优异的混沌 GA 优化模糊控制器的隶属函数和控制规则。文献[41-42]针对 ISG 型并联式 HEV,采用 PSO 优化模糊控制中的隶属度函数,与 BCS 和原模糊逻辑能量管理策略相比,其燃油经济性得到提高,电池 SOC 维持在合理区间。文献[43]采用量子 PSO 来优化模糊控制器中的量化因子,对比未优化的模糊控制策略,其制动能量回收率有所提高,其油耗和排放都有所下降。

#### (2) 神经网络优化型

神经网络能量管理策略能较好地提高燃油经济性和排放性,具有较强的实时性和鲁棒性,但其设计较为复杂,采用优化方法对神经网络的传递函数、学习速率和网络参数等设计要素进行自动调节,可以提高自适应性。本研究所指的神经网络优化型能量管理策略指采用优化算法对神经网络能量管理策略的参数进行优化的策略。文献[44-45]均采用递归神经网络对并联式 HEV 进行能量管理,在神经网络训练过程中采用扩展卡尔曼滤波方法来更新神经网络权重;不同的是,文献[45]最后利用随机摄动法对网络权重再次调整以获得更好的控制效果,与规则型能量管理策略相比,其燃油经济性提高约 10%,仿真结束时电池 SOC 值为 0.8。模糊神经网络通过构建模糊神经元将模糊逻辑与神经网络结合起来,可以看成是模糊逻辑对神经网络能量管理策略的优化,其具备了两者的优点。文献[46]采用补偿 FNN 对并联式 HEV 的能量管理系统进行控制,与电辅助能量管理策略和模糊能量管理策略相比,其具文献[47]采用 BP 神经网络对模糊控制器中的模糊规则进行记忆和优化,形成模糊 Q 学习控制算法,无需预先知晓未知工况信息,并在线调整模糊控制器的参数。

## 3 多智能体系统分析

已有研究证明了多智能体系统 (multi-agent system, MAS) 思想符合 HEV 能量管理优化控制的特点和要求<sup>[48]</sup>。MAS 具有分布性和协调性,采用 MAS 技术对复杂系统进行协同控制,具有很强的鲁棒性和

可靠性,并能提高问题求解的速度和效率。因此,将MAS技术用于求解HEV能量管理问题是一个值得研究的方向,可以实现对HEV动力总成控制系统进行集成协调控制和全局优化控制。但学术界对该研究方向的关注度较小,为此,本研究对MAS用于HEV能量管理的可行性与优势做进一步讨论。

MAS是分布式人工智能的一个重要分支,它依靠单个Agent的能力和策略,并通过各Agent之间的交互、协调与协作来完成复杂系统的问题求解和控制。MAS最大的特点是分布式自主决策和交互协作,它是求解时变的、复杂的问题的重要工具。目前,MAS常用于智能交通控制、柔性制造,机器人足球、遥控焊接机器人、分布式计算等领域,并不断向新的领域发展。HEV的动力总成系统包含了发动机系统、电机系统、电池系统和自动变速器系统,这些动力子系统在物理上和逻辑上独立,因此,可以将其抽象为发动机Agent、电机Agent、电池Agent和自动变速器Agent,这为MAS的构建提供了必要的基础条件。HEV能量管理系统是一个复杂的非线性时变系统,能量管理的主要任务是在考虑各个动力部件的工作特性和工作效率的前提下,优化控制动力系统能量流的方向和大小,即合理协调发动机与电机之间的转矩匹配,以实现总的效率最高和能量成本最低。当赋予每个Agent独立的能量管理子策略(即赋予独立知识、目标和策略),并搭配Agent之间的动力分配协调机制,便可构成混合动力汽车的MAS。此时,HEV的能量管理任务可以通过MAS中各Agent的协作协调来完成。因此,理论上将MAS技术用于HEV能量管理优化控制是可行的。MAS的许多独有特性使得应用MAS进行HEV能量管理优化控制可能带来如下优势:

(1)MAS中的策略和知识是分布存储的,并且协调协作过程是分布并行运算的,所以提高了速度,增强了实时性;

(2)MAS由HEV动力总成部件Agent构成,在进行能量协调管理时兼顾了各个动力总成部件自身的效率,因此,MAS在一定程度上对HEV动力总成系统进行了集成控制,实现整车性能全局最优;

(3)在MAS控制框架中可以嵌套ECMS算法或DP算法,再结合驾驶工况和驾驶意图识别预测技术,可以实现循环工况全局最优。

## 4 结束语

综上所述,本研究根据能量管理策略是否使用人工智能控制方式或优化算法,将并联式HEV能量管理

策略分成四大类(规则明确型、优化型、智能型和智能优化控制型)的分类概括方法是合理的。HEV能量管理系统的复杂、非线性和时变,如何通过建立、求解某目标的优化模型并给出能量分配控制变量是其核心问题;而智能优化控制的关键问题是怎样在智能控制方法的基础上嵌套优化算法来高效地控制复杂系统,不难发现,HEV能量管理的核心问题和智能优化控制的关键问题是一致的。

考虑到HEV能量管理策略的影响因素、限制条件和发展概况,将优化算法和智能控制方法有效结合的智能优化控制型能量管理策略是解决HEV能量管理问题的有效途径,而智能优化控制方法和驾驶工况预测技术的有机结合是未来的一个重要研究方向。此外,MAS技术应用于HEV能量管理优化控制也是一个值得研究的方向。

## 参考文献(References):

- [1] EHSANI M, GAO Y, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design[M]. U. S. A: CRC Press, 2010.
- [2] WIRASINGHA S G, EMADI A. Classification and review of control strategies for Plug-in hybrid electric vehicles[J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2011, 60(1):111-122.
- [3] OVERINGTON S, RAJAKARUNA S. Review of PHEV and HEV operation and control research for future direction[C] //Proceedings of 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Aalborg: IEEE, 2012.
- [4] SALMASI F R. Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison, and future trends[J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2007, 56(5):2393-2404.
- [5] 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.
- [6] PANDAY A, BANSAI H O. A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle[J]. **International Journal of Vehicular Technology**, 2014(160510):1-9.
- [7] 蔡自兴.智能控制原理与应用[M].北京:清华大学出版社, 2007.
- [8] 辛斌,陈杰,彭志红.智能优化控制:概述与展望[J]. **自动化学报**, 2013, 39(11):1831-1848.
- [9] JOHNSON V H, WIPKE K B, RAUSEN D J. HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions[J]. **SAE Transactions**, 2000, 109(3):1677-1690.

- [10] CHEN Z, XIONG R, CAO J. Particle swarm optimization-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles considering uncertain driving conditions [J]. **Energy**, 2016, 96(c) :197-208.
- [11] MONTAZERI-GH M, POURSAMAD A, GHALICHI B. Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles[J]. **Journal of the Franklin Institute**, 2006, 343(4) :420-435.
- [12] DREYFUS S. Richard bellman on the birth of dynamic programming[J]. **Operations Research**, 2002, 50(1) :48-51.
- [13] LIN C C, PENG H, GRIZZLE J W, et al. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2003, 11(6) :839-849.
- [14] LARSSON V, MARDH L J, EGARDT B, et al. Commuter route optimized energy management of hybrid electric vehicles[J]. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2014, 15(3) :1145-1154.
- [15] MURPHEY Y L, PARK J, KILIARRIS L, et al. Intelligent hybrid vehicle power control—part II: online intelligent energy management [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2013, 62(1) :69-79.
- [16] WEI Z, XU J, HALIM D. HEV energy management fuzzy logic control based on dynamic programming [C] // Proceedings of 2015 IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion. Montreal: IEEE, 2015:1-5.
- [17] CHEN B C, WU Y Y, WU Y L, et al. Adaptive power split control for a hybrid electric scooter[J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2011, 60(4) :1430-1437.
- [18] LARSSON V, JOHANNESSON L, EGARDT B. Cubic spline approximations of the dynamic programming cost-to-go in HEV energy management problems [C] // Proceedings of 2014 European Control Conference. Strasbourg: IEEE, 2014:1699-1704.
- [19] KIM B, KIM Y, KIM T, et al. HEV cruise control strategy on GPS (Navigation) information [J]. **EVS24**, 2009, 3(1) :1843-1850.
- [20] KO J, KO S, SON H, et al. Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2015, 64(2) :431-440.
- [21] KIM N, CHA S, PENG H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2011, 19(5) :1279-1287.
- [22] XU K, QIU B, LIU G, et al. Energy management strategy design of plug-in hybrid electric bus based on Pontryagin's minimum principle [C] // Proceedings of 2014 IEEE Conference and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing: IEEE, 2014.
- [23] LIU T, ZOU Y, LIU D, et al. Real-time control for a parallel hybrid electric vehicle based on Pontryagin's minimum principle [C] // Proceedings of 2014 IEEE Conference and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing: IEEE, 2014.
- [24] PAGANELLI G, DELPRAT S, GUERRA T M, et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains [C] // Proceedings of 55th IEEE Conference on Vehicular Technology. Birmingham: IEEE, 2002.
- [25] CHEN Z Y, TONG S E, JIAO B. Optimal control of energy management system for parallel hybrid electric vehicles using R-ECMS algorithm [J]. **Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research**, 2014, 32(4) :2585-2598.
- [26] KAZEMI H, KHAKI B, NIX A, et al. Utilizing situational awareness for efficient control of powertrain in parallel hybrid electric vehicles [C] // Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. Montreal: IEEE, 2015.
- [27] SCIARRETTA A, BACK M, GUZZELLA L. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2004, 12(3) :352-363.
- [28] TAGHAVIPOUR A, AZAD N L, MCPHEE J. An optimal power management strategy for power split plug-in hybrid electric vehicles [J]. **International Journal of Vehicle Design**, 2012, 60(3/4) :286-304.
- [29] BORHAN H A, VAHIDI A, PHILLIPS A M, et al. Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle [C] // Proceedings of 2009 American control conference, St. Louis: IEEE, 2009.
- [30] ABDELSALAM A A, CUI S. A fuzzy logic global power management strategy for hybrid electric vehicles based on a permanent magnet electric variable transmission [J]. **Energies**, 2012, 5(4) :1175-1198.
- [31] LANGARI R, WON J S. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle—part I: system architecture and design of the driving situation identification process [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 2005, 54(3) :925-934.
- [32] WON J S, LANGARI R. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle—part II: torque distribution, charge sustenance strategies, and performance results [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**,



- 2005,54(3):935-953.
- [33] 吴 剑,张承慧,崔纳新. 并联式混合动力汽车的 BP 网络实时能量管理[J]. 电机与控制学报,2008,12(5):610-614.
- [34] MORENO J, ORTÚZAR M E, DIXON J W. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultra capacitors and neural networks[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2006,53(2):614-623.
- [35] NAXIN C, FENGXIA L, JIAN W, et al. Optimization of HEV energy management strategy based on driving cycle modeling[C] //Proceedings of 2015 34th Chinese Control Conference. Hangzhou: IEEE,2015.
- [36] MURPHEY Y L, PARK J, CHEN Z, et al. Intelligent hybrid vehicle power control—part I: machine learning of optimal vehicle power[J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**,2012,61(8):3519-3530.
- [37] DEXTREIT C, ASSADIAN F, KOLMANOVSKY I V, et al. Hybrid electric vehicle energy management using game theory[J]. **SAE Technical Paper**. 2008,2(8):50-53.
- [38] 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.
- [39] YU Z, DAWEI M, MEILAN Z, et al. Management strategy based on genetic algorithm optimization for PHEV[J]. **International Journal of Control and Automation**,2014,7(11):399-408.
- [40] NEJHAD A Z, ASAEI B. A fuzzy-genetic algorithm approach for finding a new HEV control strategy idea[C] //Proceedings of 2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference. Tehran: IEEE,2010.
- [41] ZHAO L Y, ZHANG N N. Energy control of HEV based on fuzzy controller optimized by particle swarm optimization [J]. **Advanced Materials Research**,2014(936):2155-2159.
- [42] WU J. Fuzzy energy management strategy for plug-in HEV based on driving cycle modeling[C] //Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, Nanjing: IEEE,2014.
- [43] BERRAZOUANE S, MOHAMMEDI K. Parameter optimization via cuckoo optimization algorithm of fuzzy controller for energy management of a hybrid power system [J]. **Energy Conversion and Management**,2014,78(1):652-660.
- [44] PROKHOROV D V. Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics[J]. **Neural Networks**,2008,21(2):458-465.
- [45] FELDKAMP L, ABOU-NASR M, KOLMANOVSKY I V. Recurrent neural network training for energy management of a mild hybrid electric vehicle with an ultra-capacitor[C] //Proceedings of IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems. Nashville: IEEE,2009.
- [46] CHEN H, WU G, LUO L, et al. Simulation of hybrid electric vehicle control strategy based on compensation fuzzy neural network[C] //Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing: IEEE,2008.
- [47] HU Y, LI W, XU H, et al. An online learning control strategy for hybrid electric vehicle based on fuzzy q-learning [J]. **Energies**,2015,8(10):11167-11186.
- [48] 安徽工业大学. 一种混合动力汽车动力总成智能控制系统[P]. CN: CN103661355A,2014.

[编辑:李 辉]

## 本文引用格式:

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.

NIU Li-min, YANG Hong-yuan, ZHOU Ya-zhou. Novel classification and review on energy management strategy for parallel hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical &amp; Electrical Engineering, 2017,34(4):321-329.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn