DOI: 10.3901/JME.2019.12.168

混合动力汽车动力总成多智能体集成控制策略*

牛礼民 杨洪源 周亚洲 吕建美
(安徽工业大学机械工程学院 马鞍山 243032)

摘要: 为提高混合动力电动汽车(Hybrid electric vehicle, HEV)整车性能,结合等效燃油消耗最小模型,提出一种多智能体(Agent)控制的动力总成集成控制策略。系统 Agent 实时分解整车动力总成任务并将其分配给发动机 Agent、电机 Agent 和蓄电池 Agent,各部件 Agent 计算完成任务所需付出的油耗(或等效油耗)、排放与蓄电池能量损耗成本,采用多目标拟合优化算法求取综合成本最小的动力分配关系,得到初步请求响应转矩指令。各部件 Agent 以自身工作效率优化为目标对请求响应转矩进行限制,并与其他 Agent 交互补偿转矩信息,协调协作完成 HEV 动力总成的集成控制。在 Simulink 中建立各 Agent 模型和集成控制策略模型,嵌入到 ADVISOR 整车模型中进行不同仿真循环工况下的联合仿真。研究结果表明,集成控制策略能够实时合理权衡动力性、排放性和燃油经济性,在未损失较多动力性的前提下能够提高 HEV 节能减排能力。

关键词: 混合动力汽车; 动力总成; 多智能体; 集成控制

中图分类号: U469

Hybrid Electric Vehicle Integrated Control Strategy Based on Multi-agent

NIU Limin YANG Hongyuan ZHOU Yazhou LÜ Jianmei
(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032)

Abstract: Combined with the minimum equivalent fuel consumption model, an integrated control strategy of hybrid electric vehicle (HEV) powertrain based on multi-agent theory is proposed. The system agent decomposes the vehicle powertrain task in real time and distributes the sub-tasks to the engine agent, the motor agent and the battery agent. Each component agent calculates the cost for completion of tasks of fuel consumption (or equivalent fuel consumption), emissions and battery energy loss. The multi-objective fitting optimization algorithm is used to obtain the dynamic allocation relation of engine and motor with minimum integrated cost, and the initial request response torque command is obtained. Aiming at its own efficiency optimization, each component agent interacts with others for the limitation of torque command and exchanging compensation torque information for the completion coordination control task of the HEV powertrain. The Simulink model of each agent is established and Multi-agents (MA) integrated control strategy model is then built. These models are integrated into the vehicle model of ADVISOR and simulations are carried out under different driving cycles. The Simulation results show that by the means of the coordination of each agent and the integrated control of the powertrain components, the MA integrated control strategy can reasonably weigh the dynamic, emissions and fuel consumption economy to improve the capacity of energy-saving and emission reduction without losing too much power.

Key words: hybrid electric vehicle (HEV); powertrain; multi-agent; integrated control

0 前言

动力总成控制策略是混合动力电动汽车的核心技术之一,主要负责在满足驾驶需求的情况下,优化并控制发动机与电机/电池组间的动力输出。目前,混合动力电动汽车(Hybrid electric vehicle, HEV)

动力总成控制策略通常被分为基于优化和基于规则两大类^[1-4],而将优化算法与人工智能控制方法有效结合使得控制策略不仅具备了瞬时优化或全局优化的优点,还具备了人工智能独有的智能性与高实时性,是未来解决 HEV 动力总成控制问题的有效途径和重点研究趋势之一。文献[5]采用等效油耗最小算法离线仿真得到 HEV 能量瞬时最优分配解集,将其作为训练样本对反向传播(Back propagation, BP)神经网络控制器进行训练,形成神经网络能量管理策略,较好复现了等效油耗最小算法的控制效果并提高了算法的实时性。为了模拟动态规划算法的控制

* 国家自然科学基金(51275002)、江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室开放基金(BM20082061502)和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(lzsy-07)资助项目。20180506 收到初稿,20181212 收到修改稿

效果,部分学者利用动态规划算法结合多种标准工况离线仿真得到能量全局最优控制解集并将其作为神经网络训练样本,进而结合循环工况识别与预测技术建立了神经网络能量管理策略^[6-9]。文献[10]以发动机燃油消耗为适应度函数,采用遗传算法优化模糊逻辑能量管理策略的隶属度函数。文献[11]同时考虑燃油经济性和排放性,采用性能更优异的混沌遗传算法优化模糊控制器的隶属函数与控制规则。然而,上述文献未从整车集成的角度对 HEV 节能减排进行研究。

多智能体系统(Multi-agent system, MAS)属于分布式人工智能的一个重要分支,依靠单个智能体的能力与策略及多智能体(Multi-agent, MA)间的交互、协调与协作来完成复杂问题的求解与控制^[12-13]。多智能体应用领域广泛,在智能调度^[14]、充电协同^[15-16]、数据融合与分类^[17]以及城市路网控制^[18]等方面,发挥出了多智能体控制理论在解决诸如多目标优化、子系统协同控制等复杂控制问题时的优势。但目前将多智能体技术与优化算法有机结合应用于 HEV 动力总成控制策略的研究报道尚不多见。因此,本文以此为研究切入点,将等效燃油消耗模型与多智能体技术相结合,提出 HEV 动力总成多智能体的集成控制策略,并设置电辅助控制策略作为测试参照,对不同测试工况下整车的动力性、排放性和油耗进行分析,以保证 HEV 良好动力性能,增强节能减排效果,为 HEV 动力总成控制策略提供一种新的研究途径。

1 MA 体系结构

以并联式 HEV 为基础研究车型,由于发动机及其控制单元(Engine control unit, ECU)、电机及其控制单元(Motor control unit, MCU)和蓄电池及其管理系统(Battery management system, BMS)在物理上相互独立且具有分布性。因此,在 HEV 动力总成 MA 体系中定义一个系统 Agent 和三个部件 Agent,分别是发动机 Agent、电机 Agent 和蓄电池 Agent。HEV 动力总成 MA 体系结构如图 1 所示,其系统层包含系统 Agent,它负责分解动力总成任务和优化计算以做出初步的动力请求响应指令;协调层包含发动机 Agent、电机 Agent 和蓄电池 Agent,它确定各 Agent 之间的信息交互关系与协作关系;发动机及其 ECU、电机及其 MCU 与蓄电池及其 BMS 处于执行层,它负责采集实时工况信息,执行各部件 Agent 下达的动力输出指令。

图 1 HEV 动力总成 MA 体系结构

2 MA 集成控制策略

MA 集成控制策略分两级别,初级为系统 Agent 分解 HEV 动力总成任务,部件 Agent 计算任务成本,再由系统 Agent 对成本进行多目标最优求解初级动力请求响应指令;终级为部件 Agent 结合工作效率和运行工况微调初级动力请求响应指令,并与其他部件 Agent 交互协调产生动力响应指令。图 2 所示为 MA 集成控制策略控制流程。

图 2 MA 集成控制策略控制流程

第①步:系统 Agent 确定当前时刻电机输出转矩能力范围和动力耦合关系确定电机任务、发动机任务和蓄电池任务并分配给对应的部件。

第②步:电机 Agent 计算电机等效油耗成本,蓄电池 Agent 计算能量损耗成本,发动机 Agent 计算油耗成本和排放成本;各部件 Agent 将任务成本返回给系统 Agent。

第③步:计算每一个成本项的加权因子。

第④步:系统 Agent 结合加权因子、油耗成本、排放成本和能量损耗成本定义多目标成本函数,通过曲线拟合和最小值原理求取最优的发动机与电机转矩分配关系。

第⑤步:系统 Agent 分别向各部件 Agent 下达相应的初步动力请求响应指令。

第⑥步:各部件 Agent 以保证自身最高效动力

输出为目标, 结合部件运行工况信息对请求响应转矩进行限制, 并与其他 Agent 交互补偿转矩信息, 在协调协作中完成动力匹配。

2.1 系统 Agent

系统 Agent 的功能是分解动力总成任务和优化计算以做出初步的动力请求响应指令，其 Matlab/Simulink 模型包含任务分解与分配模块和拟合求优模块，如图 3 所示。

图 3 系统 Agent 模型

2.1.1 任务分解与分配模块

确定电机任务：当前时刻电机转矩工作范围取决于整车需求转矩 T_{req} 、电机响应能力以及蓄电池工作能力，电机作为发电机时，其最大充电转矩 $T_{\text{m_max_charge}}$ (充电转矩为负)由以下各值的极大值确定。

(1) 整车需求转矩 T_{req} 与在需求转速 ω_{req} 下的发动机最大转矩之差。

(2) 电机在整车需求转速 ω_{req} 下的最小充电转矩。

(3) 当前时刻蓄电池能吸收的最小充电转矩, 它取决于蓄电池当前的工作状态, 如荷电状态(State of charge, SOC)与温度 t_{pgs} 。

电机作为电动机时，其最大放电转矩 $T_{m, \max \text{ discharge}}$ 由以下各值的最小值确定。

(1) 整车需求转矩 T_{req} 。

(2) 电机在整车需求转速 ω_{req} 下的最大放电转矩。

(3) 当前时刻蓄电池所能提供给电机的最大放电转矩, 它受限于蓄电池 SOC 值、温度 t_{ess} 及整车电气负载功率 $P_{\text{elec.aux}}$ 。

确定电机转矩工作范围后,在该区间内连续均匀地取 10 个值,则电机转矩增量为 $dT_m = (T_{m_max_discharge} - T_{m_max_charge})/10$,所对应的电机任务可以表示为

$$T_m^{n+1} = T_{m \text{ max charge}} + n \cdot dT_m, n = 0, 1, \dots, 9 \quad (1)$$

发动机与电机的转矩耦合关系为

$$T_e = T_{\text{req}} - i_c \cdot T_m \quad (2)$$

联合式(1)和式(2)可确定发动机的任务为

$$T_e^{n+1} = T_{\text{req}} - i_c \cdot T_m^{n+1}, n = 0, 1, \dots, 9 \quad (3)$$

式(1)~(3)中, T_m 、 T_e 分别为任务分配的电机、发动机转矩命令, i 为耦合器中电机端减速比。

确定蓄电池任务：当电机输出负转矩对电池进行充电时，由当前工作点的充电转矩乘以转速得到电机的充电功率，再乘以电机在该工作点的充电效率，得到电机能够向蓄电池发出的充电功率；同理，当电池向电机放电、电机输出正转矩驱动车辆行驶时，由电机当前工作点的驱动功率除以电机在该点的驱动效率，得到蓄电池需要向电机提供的输出功率，电机充放电效率可通过查询电机的外特性表得到，则蓄电池任务可以表示为

$$P_{\text{ess}}^{n+1} = \begin{cases} T_{\text{m}}^{n+1} \cdot \omega_{\text{req}} \cdot i_{\text{c}} \cdot \eta_{\text{m_charge}}^{n+1}, & T_{\text{m}}^{n+1} < 0 \\ \frac{T_{\text{m}}^{n+1} \cdot \omega_{\text{req}} \cdot i_{\text{c}}}{\eta_{\text{m_discharge}}^{n+1}}, & T_{\text{m}}^{n+1} \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.1.2 拟合求优与决策模块

拟合求优与决策模块首先将各成本项进行单位化一，然后计算各成本项的加权因子，最后确定关于各成本项的多项式成本函数，通过曲线拟合和最小值原理求取最优的发动机与电机转矩分配关系，并分别向各部件 Agent 下达相应的请求响应转矩指令。

第一步：单位化一。

这里定义 6 个成本项目, 分别为整车油耗成本 $J_{\text{veh_energy}}^{n+1}$ 、蓄电池能量损耗成本 $J_{\text{ess_energy_loss}}^{n+1}$ 、发动机排放成本, 包括 HC 成本 $G_{\text{e_HC}}^{n+1}$ 、CO 成本 $G_{\text{e_CO}}^{n+1}$ 、NO_x 成本 $G_{\text{e_NO}_x}^{n+1}$ 及 PM 成本 $G_{\text{e_PM}}^{n+1}$ 。

整车油耗成本包含发动机油耗成本和电机等效油耗成本

$$J_{\text{veh energy}}^{n+1} = J_{\text{e fuel energy}}^{n+1} + J_{\text{m effect fuel energy}}^{n+1} \quad (5)$$

整车油耗成本和蓄电池能量损耗成本单位焦耳(J)，其他成本项单位克(g)。因为各成本项单位及数量级都不统一，须将各成本项进行单位化一处理，使得各成本项具有可比性。化一后各成本项 C_{xx}^{n+1} 的度量范围为[0,1]，其中 0 表示最小成本，1 表示最大成本。

$$C_{XX}^{n+1} = \frac{C_{XX}^0 - \min(C_{XX}^{n+1})}{\max(C_{XX}^{n+1}) - \min(C_{XX}^{n+1})} \quad (6)$$

式中, C_{XX}^0 为成本项当前值, $\min(C_{XX}^{n+1})$ 为成本项最小值, $\max(C_{XX}^{n+1})$ 为成本项最大值。

第二步: 确定加权因子。

利用成本项的最大值与成本项目标性能参量的比值作为加权因子 α

$$\alpha = \frac{\max(C_{XX}^{n+1})}{C_{XX_target}} \quad (7)$$

式中, C_{XX_target} 为成本项目标性能参量。

油耗和排放物的目标性能参量需要符合当前国际主流的排放法规, 可依据美国 PNGV 计划来确定具体数值。电池目标效率参量可以通过参考蓄电池的充放电特性曲线来设置。通常蓄电池的充电效率随着 SOC 值的增大而减小, 放电效率则正好相反; 另外, SOC 值在 0.4~0.6 之间的充放电效率普遍较高, 协调策略为了提高蓄电池充放电效率, 减少充放电能量损耗, 应当尽可能地使电池在中间 SOC 处工作, 因此将电池目标效率参量值设置为 0.95, 各性能参量取值见表 1 所示。

表 1 各成本项目标性能参量取值

成本项目标性能参量	取值
整车油耗/(mile/gallon)	80
HC/(g/mile)	0.125
CO/(g/mile)	1.7
NO _x /(g/mile)	0.07
PM/(g/mile)	0.08
蓄电池效率/%	95

由于各成本项与其对应的目标性能参量的单位不相同, 需要将目标性能参量的单位转换为相应成本项的单位。利用过去 5 s 内的平均车速 v_{ave} 来衡量各成本项目标性能参量在当前时间步内的等效成本(时间步长度为 1 s)。

对于油耗成本目标性能参量

$$C_{veh_energy_target} = \frac{235}{C_{veh_energy_target}^*} \cdot \frac{v_{ave} t}{10^5} \cdot \rho_{fuel} \cdot q_{fuel} \quad (8)$$

式中, 新目标性能参量 $C_{veh_energy_target}$ 的单位为 J, 原目标性能参量 $C_{veh_energy_target}^*$ 的单位为 mile/gallon; v_{ave} 为过去 5 秒内的平均速度, 单位为 m/s; t 为当前时间步的长度, $t=1$ s; ρ_{fuel} 为燃油密度, 单位为 g/L; q_{fuel} 为燃油热值, 单位为 J/g。

对于排放成本目标性能参量

$$C_{e_XX} = \frac{C_{e_XX}^*}{1.609\,344} \cdot \frac{v_{ave} t}{1\,000} \quad (9)$$

式中, 新目标性能参量 C_{e_XX} 的单位为 g, 原目标性能参量 $C_{e_XX}^*$ 的单位为 g/mile。

第三步: 确定多目标成本优化函数。

根据上述分析, 建立多目标成本优化函数

$$C_{overall} = \alpha_1 C_{veh_energy_target} + \alpha_2 C_{e_HC} + \alpha_3 C_{e_CO} + \alpha_4 C_{e_NO_x} + \alpha_5 C_{e_PM} + \alpha_6 C_{ess_energy_loss} \quad (10)$$

式中: $C_{overall}$ 整车的综合成本, 是关于 T_m 的函数。

第四步: 拟合求优与决策

拟合求优与决策的具体过程: 首先将各归一化成本项 C_{XX}^{n+1} ($n=0,1,2,\dots,9$) 代入式(10)中计算出对应各任务的总成本值 $C_{overall}^{n+1}$, 然后使用 MATLAB 对 T_m^{n+1} 和 $C_{overall}^{n+1}$ 进行 5 阶多项式拟合, 利用最小值原理求 $C_{overall}$ 的最小值及其对应的电机转矩值, 记为电机请求响应转矩 $T_{m_req_output}$, 并将其发送给电机 Agent; 再根据式(2)求对应的发动机转矩值, 记为发动机请求响应转矩 $T_{e_req_output}$, 并将其送给发动机 Agent。

2.2 发动机 Agent

发动机 Agent 的功能是计算发动机任务油耗以及排放成本, 根据发动机运行状态对请求响应转矩进行限制, 并请求电机 Agent 提供转矩补偿, 其 MATLAB/Simulink 模型包含成本计算模块和请求转矩补偿模块与限制模块, 如图 4 所示。

图 4 发动机 Agent 模型

2.2.1 成本计算模块

利用 S 函数 fc_cost 调用发动机油耗和排放仿真模型 $fc_fuel_and_emissions$ 来计算各发动机任务的油耗和排放。对于某一确定的发动机转矩和转速, 发动机油耗及各种排放量可通过油耗 Map 图和各排放物 Map 图线性插值得到^[19]

$$\begin{cases} G_{e_fuel} = \int_0^t \dot{m}_{fuel} dt = \int_0^t f(T_e, \omega_e) dt \\ G_{e_emis_XX} = \int_0^t \dot{m}_{emis_XX} dt = \int_0^t f(T_e, \omega_e) dt \end{cases} \quad (11)$$

式中, G_{e_fuel} 为累积油耗(g), $\dot{m}_{fuel}$ 为单位时间油耗

量(g/s), $G_{e_emis_XX}$ (HC、CO、NO_x 或 PM) 累积排放量(g), $\dot{m}_{e_emis_XX}$ 为各种排放物单位时间排放量(g/s), $f(T_e, \omega_e)$ 是二维查表插值函数; t 为模型仿真时长, 取值 1 s。

发动机油耗成本为油耗与燃油热值的乘积

$$J_{e_fuel_energy} = q_{fuel} \cdot G_{e_fuel} \quad (12)$$

2.2.2 发动机请求转矩补偿模块与转矩限制模块

发动机 Agent 接收到请求响应转矩 $T_{e_req_output}$ 后, 先查询对应当前需求转速 ω_{req} 的发动机最大输出转矩 T_{e_max} 和最小输出转矩 T_{e_min} , 然后利用其限制 $T_{e_req_output}$, 对于超出 T_{e_max} 或小于 T_{e_min} 的部分, 请求电机 Agent 补偿协同转矩 $T_{m_req_by_e}$ 。当接收到发动机补偿转矩 $T_{e_req_by_m}$ 后, 对 $T_{e_req_output}$ 与 $T_{e_req_by_m}$ 进行求和得到发动机总请求响应转矩 $T_{e_req_all_output}$, 然后利用发动机的 T_{e_max} 和 T_{e_min} 对其进行限制后得到发动机响应转矩 T_{e_output} 并将其传递给发动机 ECU, 发动机 ECU 控制发动机工作。

2.3 电机 Agent

电机消耗的电能可以等效为一定量的油耗, 电机 Agent 的功能是计算电机任务等效油耗成本, 根据电机运行状态对电机请求响应转矩进行限制, 并请求发动机 Agent 提供转矩补偿, 其 Simulink 模型包含等效燃油消耗成本计算模块和电机请求转矩补偿与转矩限制模块, 如图 5 所示。

图 5 电机 Agent 模型

2.3.1 等效燃油消耗成本计算模块

美国可再生能源实验室的 JOHNSON 等提出了基于 ΔSOC 的电机等效油耗思想, 主要根据发动机油耗、电机转矩与 ΔSOC 的对应关系来逆向查询某个电机工作点的等效油耗^[20]。电机 Agent 利用基于 ΔSOC 的电机等效油耗算法来求解电机任务所需要的等效油耗成本。

第一步: 确定对应电机任务的发动机油耗成本。

由式(2)可以确定电机转矩与发动机转矩的对应关系, 则电机转矩与对应的发动机油耗的关系为

$$\frac{J_{e_fuel_energy}}{q_{fuel}} = \int_0^t f(T_{req} - i_c \cdot T_m, \omega_m / i_c) dt \quad (13)$$

第二步: 确定对应电机任务的蓄电池 ΔSOC 。

蓄电池 ΔSOC 由两部分构成, 一是由发动机给蓄电池充电或者蓄电池放电引起的 SOC 变化, 记为 ΔSOC_{fuel} ; 二是由再生制动能量引起的 SOC 变化, 记为 ΔSOC_{regen} 。对应电机任务 $(T_m^{n+1}, \omega_{req} / i_c)$ 的蓄电池 ΔSOC 可以表示为

$$\Delta SOC = \Delta SOC_{fuel} + \Delta SOC_{regen} = \varphi(T_m^{n+1}, \omega_{req} / i_c) \quad (14)$$

第三步: 确定 ΔSOC 与发动机油耗成本之间的关系。

$$J_{e_fuel_energy} = \gamma(\Delta SOC) \quad (15)$$

第四步: 求电机等效油耗。

在蓄电池 ΔSOC 与发动机油耗成本的拟合曲线中, 按照电机任务 $(T_m^{n+1}, \omega_{req} / i_c)$ 所对应的 ΔSOC_{regen} 的相反变化(即取 $-\Delta SOC_{regen}$)查询, 可以得到总的油耗成本 $J_{all_fuel_energy}$, 减去发动机单独驱动时所需的燃油消耗成本 $J_{e_alone_fuel_energy}$ 即可得到电机等效油耗成本 $J_{m_effect_fuel_energy}$

$$\begin{cases} J_{all_fuel_energy} = \gamma(-\Delta SOC_{regen}) \\ J_{m_effect_fuel_energy} = J_{all_fuel_energy} - J_{e_alone_fuel_energy} \end{cases} \quad (16)$$

2.3.2 电机请求转矩补偿与转矩限制模块

电机转矩补偿与转矩限制模块的工作流程见图 6。首先判断蓄电池开关信号 ESS_on 是否为零, 如果成立($ESS_on = 0$ 此时蓄电池不可充放电), 则发动机补偿转矩 $T_{e_req_by_m}$ 等于电机总请求响应转矩 $T_{m_req_all_output}$, 电机响应转矩 T_{m_output} 等于零; 否则($ESS_on = 1$ 此时蓄电池可充放电)继续判断 $T_{m_req_all_output}$ 是否大于零, 如果成立, 则再判断它是否小于当前需求转速下的最大助力转矩 $T_{m_max_motor}$, 如果成立, 则 $T_{e_req_by_m}$ 等于零, T_{m_output} 等于 $T_{m_req_all_output}$, 否则 $T_{e_req_by_m}$ 等于 $T_{m_req_all_output}$ 与 $T_{m_max_motor}$ 的差值, T_{m_output} 等于 $T_{m_max_motor}$; 如果 $T_{m_req_all_output}$ 大于零的条件不成立, 则再判断 $T_{m_req_all_output}$ 是否大于当前需求转速下的最大发电转矩 $T_{m_max_gen}$, 如果成立, 则 $T_{e_req_by_m}$ 等于零, T_{m_output} 等于 $T_{m_req_all_output}$, 否则 $T_{e_req_by_m}$ 等于 $T_{m_req_all_output}$ 与 $T_{m_max_gen}$ 的差值, T_{m_output} 等于 $T_{m_max_gen}$ 。电机 Agent 向发动机 Agent 发送 $T_{e_req_by_m}$, 请求发动机提供补偿转矩, 向电机 MCU 发送电机响应转矩 T_{m_output} 。

图 6 电机转矩补偿与转矩限制工作流程

2.4 蓄电池 Agent

蓄电池 Agent 的功能是计算蓄电池能量损耗成本以及充放电效率、根据 SOC 值限制蓄电池充放电、计算蓄电池响应功率并传递至 BMS。蓄电池 Agent 包含蓄电池成本计算模块、充放电限制模块以及响应功率计算模块，模型如图 7 所示。

蓄电池成本计算模块

图 7 蓄电池 Agent 模型

2.4.1 蓄电池成本计算模块

S 函数 ess_cost 计算各任务的蓄电池能量损耗成本和效率，其工作原理为：根据功率 P_{ess} 、当前 SOC 值以及温度 t_{ess} 查询蓄电池开路电压 V_{oc} 和充放电内阻 R_{int} ，功率限制模块对蓄电池功率进行限制，电流计算模块求充放电电流 I 和路端电压 V 。充电时，蓄电池能量损耗成本等于电池内阻损耗；放电时，蓄电池能量损耗成本等于电池内阻损耗与库仑效率损耗的总和。

$$J_{ess_energy_loss} = \begin{cases} I^2 \cdot R_{int}, & P_{ess} > 0 \\ I^2 \cdot R_{int} - VI(1 - \mu), & P_{ess} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\eta_{ess} = \begin{cases} V / V_{oc}, & P_{ess} > 0 \\ V_{oc} / V, & P_{ess} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中， $J_{ess_energy_loss}$ 为蓄电池能量损耗成本， μ 为库

仑效率。

2.4.2 充放电限制模块

蓄电池充放电限制模块判断蓄电池开关信号 ESS_on 的逻辑值并将其发送给电机 Agent。模块的工作流程如图 8 所示，首先判断 $T_{m_req_output}$ 是否等于零，如果成立，则 $ESS_on = 1$ (表示蓄电池可充放电)，否则，继续判断 $T_{m_req_output}$ 是否大于零，在 $T_{m_req_output}$ 大于零的情况下，如果 SOC 大于 SOC_{low} ，则 $ESS_on = 1$ ，反之 $ESS_on = 0$ (蓄电池不可充放电)；在 $T_{m_req_output}$ 小于零的情况下，如果 SOC 低于 SOC_{high} ，则 $ESS_on = 1$ ，反之 $ESS_on = 0$ 。

图 8 充放电限制模块的工作流程

2.4.3 响应功率计算模块

蓄电池响应功率计算模块 Simulink 模型如图 9 所示，如果 ESS_on 值为 1，则蓄电池 Agent 计算蓄电池响应功率，并将其传递给蓄电池 BMS，否则蓄电池响应功率 P_{ess_output} 为零。

图 9 响应功率计算模块的控制模型

3 控制策略仿真分析

3.1 整车仿真模型

整车仿真参数如表 2 所示。将 MA 集成控制策略模型嵌入 ADVISOR 整车仿真模型中，如图 10 所示，各部件 Agent 与相应的动力部件相连，MA 集成控制策略计算出合理的发动机输出转矩与转速、电机输出转矩与转速以及蓄电池输出功率，然后将其发送给相应的执行部件电子控制单元，从而完成 HEV 动力总成分配和集成控制。

图 10 MA 集成控制策略整车仿真模型

表 2 仿真车型相关参数

仿真参数	数值	仿真参数	数值
满载质量/kg	1 670	滚动阻力系数	0.017
迎风面积/m ²	2	发动机最大功率/kW	54
风阻系数	0.29	电机最大功率/kW	54
轮胎滚动半径/m	0.334	蓄电池容量/(A·h)	100

3.2 发动机与电动机工作效率仿真分析

在 NEDC 仿真工况下, 分别对 MA 集成控制策略和电辅助控制策略控制下的发动机和电动机工作效率进行仿真分析, 以此评价控制策略的优劣。图 11a、图 12a 分别是 MA 集成控制策略下发动机效率

图和电机效率图, 图 11b、12b 分别是电辅助控制下发动机效率图和电机效率图。

(a) MA 集成控制策略下发动机效率

(b) 电辅助策略下发动机效率

图 11 发动机效率

(a) MA 集成控制策略下电机效率

(b) 电辅助策略下电机效率

图 12 电机效率

MA 集成控制策略下发动机工作点主要落在效率值[0.15, 0.35]区间, 而电辅助控制策略下发动机工作点则主要集中在效率值[0, 0.25]区间内。在 0~800 s, 前者的效率值比后者的效率值高; 在 800~1 369 s, 两种控制策略下发动机工作点的分布均较为连续、密集, 且效率值均在 [0.25, 0.35]区间内。两种控制策略下电动机工作点分布略为相似, 在 0~800 s 分布较为分散, 800 s 后呈近似平行于时间

轴的直线分布,说明电动机处于稳定工作状态;MA 集成控制策略下电动机工作点的效率值在[0.7, 0.9]区间内,而电辅助控制策略下电动机工作点的效率值在[0.6, 0.8]区间内,总体而言,前者效率相比于后者高出约 10%。

3.3 整车性能仿真分析

在 NEDC 和 UDSS 仿真工况下,两种控制策略下的整车性能仿真结果见表 3 所示。

表 3 不同控制策略下整车性能仿真结果

参数	MA 集成控制策略		电辅助控制策略	
	NEDC	UDSS	NEDC	UDSS
加速时间 t/s	11.8	11.8	9.3	9.3
最高车速/(km/h)	213.7	213.7	211.7	211.7
最大爬坡度(%)	45.3	45.3	50.3	50.3
油耗/(L/100km)	4.4	4.0	5.9	5.9
HC/(g/km)	0.361	0.327	0.451	0.431
CO/(g/km)	2.406	2.774	1.980	1.936
NO _x /(g/km)	0.151	0.206	0.220	0.270
PM/(g/km)	0.132	0.193	0.187	0.247

分析表中数据可知,在 NEDC 和 UDSS 仿真工况下,MA 集成控制策略下的动力性比电辅助控制策略下的动力性略微下降,0~100 km/h 加速时间增加 2.5 s,比设计值 10 s 增加 1.8 s,降幅不大,由于实际行车过程中的急加速工况较少,因此可以认为加速性基本满足设计要求,最大车速达到 213.7 km/h,增加了 2 km/h,性能上升 0.9%,满足最大车速设计要求;30 km/h 下最大爬坡度达到 45.3%,下降了 5%,但仍满足设计要求。在 NEDC 和 UDSS 仿真工况下,MA 集成控制策略下的油耗比电辅助控制策略下的油耗分别降低 25.42%和 32.20%,HC 分别减少 19.96%和 24.12%,CO 分别增加 21.52%和 43.29%,NO_x 分别减少 31.36%和 23.70%,PM 分别减少 29.41%和 21.86%。综合来看,MA 集成控制策略下的整车性能与电辅助控制策略下的整车性能相比,在燃油经济性方面取得很大的提升;在排放性能方面,HC、NO_x 以及 PM 排放量均有所减少,仅 CO 排放量有所增加。

图 13~15 和图 16~18 分别为 NEDC 和 UDSS 工况下蓄电池 SOC、发动机输出转矩与电机输出转矩的对比。图 13 中,初始 SOC 值均为 0.7,工况运行结束后,电辅助策略与 MA 集成控制策略下的蓄电池剩余 SOC 值分别为 0.681 和 0.676,仅相差 0.005;同时由图 11a 知,由于电机处于高效区,即使是在相同初始 SOC 值下,虽然 MA 策略更倾向于

电驱动,但工况结束后,两策略的终了 SOC 值基本没有差别,这表明 MA 策略的节能减排效果明显,优于电辅助策略。

图 13 NEDC 工况下 SOC 变化情况对比

图 14 NEDC 工况下发动机输出转矩对比

图 15 NEDC 工况下电机输出转矩对比

图 16 UDDS 工况下 SOC 变化情况对比

图 17 UDDS 工况下发动机输出转矩对比

图 18 UDDS 工况下电机输出转矩对比

从图 14、15 可以看出,电辅助策略下,发动机输出转矩的时间较多,电机输出的转矩较少且低,这是由于电机扮演的仅是“辅助”的角色,并没有参与至整个系统的最优决策过程中来。对比 MA 控

制策略,此时电机输出转矩的时间较长,尤其是在车速较低的情况下,同时在车速较快及需要急加速的情况下,电机与发动机共同参与驱动车辆行驶,并依据 MA 策略实时求解,协调分配转矩,在保证动力性的情况下,获得最佳燃油经济性。

同理,图 16~18 中, UDDS 工况下, MA 集成控制策略控制效果基本与 NEDC 下的情况一致。电辅助策略与 MA 集成控制策略下的蓄电池剩余 SOC 值分别为 0.679 和 0.673,仅相差 0.006,同时 MA 集成策略下,电机能够更多地参与驱动,整车燃油经济性得到提升,排放量降低。

4 结论

(1) MA 集成控制策略的特点是融合电机等效燃油消耗最小模型、多智能体理论及多目标优化算法,考虑满足当前驱动要求的发动机和电机联合工作点的油耗、排放以及蓄电池能量损耗成本,通过定义关于油耗、排放与和蓄电池能量损耗的多项成本函数的方式确定初步动力分配关系,并通过 MA 的协调协作完成 HEV 动力总成的集成控制。

(2) 在 NEDC 下的仿真结果表明 MA 集成控制策略下的发动机与电动机工作点效率都比电辅助控制策略下的发动机与电动机工作点效率高。

(3) 在 NEDC 和 UDDS 仿真工况下, MA 集成控制策略下的燃油经济性和排放性均比电辅助控制策略下的燃油经济性和排放性要好,但排放物 CO 有所上升,整车动力性略微下降,下一步将开展集成控制的台架可靠性试验。

参 考 文 献

- [1] 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.
CHEN Hong, GONG Xun, HU Yunfeng, et al. Automotive control: the state of the art and perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 322-346.
- [2] 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.
WANG Qinpu, YOU Sixiong, LI Liang, et al. Survey on energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 1-9.
- [3] PANDAY A, BANSAL H O. A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle[J]. International Journal of Vehicular Technology, 2014: 1-19.

- [4] OVERINGTON S, RAJAKARUN S. Review of PHEV and HEV operation and control research for future direction[C]// IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Aalborg, Denmark: IEEE, 2012: 385-392.
- [5] 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.
WU Jian, ZHANG Chenghui, CUI Naxin. Real-time energy management of parallel hybrid electric vehicle based on BP neural network[J]. Electric Machines and control, 2008, 12(5): 610-614.
- [6] MURPHEY Y L, PARK J, KILIARIS 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.
- [7] 徐萍萍, 宋建国, 王雁峰, 等. 基于小波神经网络的混合动力汽车实时控制策略[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(11): 2455-2459.
XU Pingping, SONG Jianguo, WANG Yanfeng, et al. Real-time control strategy of hybrid electric vehicle based on wavelet neural network[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(11): 2455-2459.
- [8] CUI Naxin, LIAN Fengxia, WU Jian, et al. Optimization of HEV energy management strategy based on driving cycle modeling[C]//Proceedings of the 34th Chinese Control Conference. Hangzhou, China: IEEE, 2015: 7983-7987.
- [9] 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.
- [10] 杨世春, 朱传高, 高莹, 等. 并联式混合动力汽车遗传模糊控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(2): 106-111.
YANG Shichun, ZHU Chuangao, GAO Ying, et al. A Research on the genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric Vehicle[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(2): 106-111.
- [11] 梁俊毅, 张建龙, 马雪瑞, 等. 基于多混沌算子遗传算法的混合动力汽车能量管理策略优化[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 442-449.
LIANG Junyi, ZHANG Jianlong, MA Xuerui, et al. Control strategy optimization for hybrid electric vehicle based on multi-chaotic operators genetic algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(4): 442-449.
- [12] 李士勇, 张云, 栾秀春. 多 Agent 倒立摆模糊控制系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1628-1630.
LI Shiyong, ZHANG Yun, LUAN Xiuchun. Multi-agent-based fuzzy control system for an inverted pendulum[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1628-1630.
- [13] 贾利民, 刘刚, 秦勇. 基于智能 Agent 的动态协作任务求解[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
JIA Limin, LIU Gang, QIN Yong. Intelligent agent based dynamic collaboration mechanism for complex task solving[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [14] SHEN Weiming, WANG Lihui, HAO Qi. Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2006, 36(4): 563-577.
- [15] 许少伦, 严正, 冯冬涵, 等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 7-13.
XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 7-13.
- [16] MOCCI S, NATALE N, PILO F, et al. Demand side integration in LV smart grids with multi-agent control system[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 125: 23-33.
- [17] 洪铭, 柳培忠, 骆炎民. 一种基于多智能体策略的人工免疫网络数据分类方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(1): 151-155.
HONG Ming, LIU Peizhong, LUO Yanmin. Multi-agent based artificial immune network algorithm for data classification[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(1): 151-155.
- [18] 王力, 李岱, 何忠贺, 等. 基于多智能体分群同步的城市路网交通控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1448-1456.
WANG Li, LI Dai, HE Zhonghe, et al. Urban traffic network control based on consensus of multi-agent systems[J]. Control Theory and Applications, 2014, 31(11): 1448-1456.
- [19] 张斌, 李见波, 吴淑梅. 基于 Matlab 的柴油机建模及欧 VI 标定方法研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(2): 101-104.

- of hunting motion on ride quality of railway vehicle[J].
Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 639-643.
- [18] 傅志方. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- FU Zhifang. Modal analysis theory and application[M].
Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000.

作者简介: 李凡松, 男, 1989 年出生, 博士。主要研究方向为车体弹性

振动与疲劳强度。

E-mail: lifansong2013@163.com

王建斌, 男, 1981 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为车辆振动与振动测试。

E-mail: resunwang@163.com

石怀龙, 男, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为车辆减振与弹性振动。

E-mail: hl_shi@126.com

郭平波(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆系统动力学与结构可靠性。

E-mail: wupingbo@163.com

(上接第 177 页)

- ZHANG Bin, LI Jianbo, WU Shumei. Investigation on
diesel engine modeling based on Matlab and EU VI
calibration method[J]. Chinese Internal Combustion
Engine Engineering, 2016, 37(2): 101-104.
- [20] 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.

作者简介: 牛礼民, 男, 1976 年出生, 博士后, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆动态性能模拟和电动汽车控制技术。

E-mail: niulimin@ahut.edu.cn