

混合动力电动汽车能量管理策略研究综述

赵秀春^{1,2} 郭戈³

摘要 能量管理对于提高混合动力电动汽车 (Hybrid electric vehicles, HEVs) 的燃油经济性、驾驶性能及减少排放具有至关重要的作用. 本文对混合动力电动汽车能量管理问题的研究进展及现状进行了全面总结, 从不同角度对混合动力电动汽车的能量管理问题进行描述, 并对主要能量管理策略进行了分析和对比研究, 指出各种控制方法的优点及其存在的问题与不足, 最后对混合动力电动汽车能量管理策略研究的未来发展方向进行了展望.

关键词 混合动力电动汽车, 能量管理, 优化, 控制方法

引用格式 赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车能量管理策略研究综述. 自动化学报, 2016, 42(3): 321–334

DOI 10.16383/j.aas.2016.c150477

Survey on Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles

ZHAO Xiu-Chun^{1,2} GUO Ge³

Abstract Energy management is very important for improving fuel economy, driving performance and reducing emissions of hybrid electric vehicles (HEVs). We give an overview of the progress and the status quo of the energy management problem of HEVs. Various definitions of the energy management problem are introduced from different views. A variety of control methods are analyzed and compared with each other. Finally, some discussions about potential directions and challenges for future research on the energy management problem of hybrid electric vehicles are presented.

Key words Hybrid electric vehicle (HEV), energy management, optimization, control method

Citation Zhao Xiu-Chun, Guo Ge. Survey on energy management strategies for hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(3): 321–334

混合动力电动汽车 (Hybrid electric vehicle, HEV) 是配备了两种或两种以上动力源 (其中一种动力由电动机提供) 的汽车, 它具备传统汽车和纯电动汽车两者的优点. 通过不同能源的优化互补、协调合作, 可在保证汽车动力性、安全性及舒适性的前提下, 改善汽车的节能减排性能. 由于电池技术尚未取得突破性进展, 因此混合动力电动汽车成为汽车厂商和研究机构关注与研究的热点.

混合动力电动汽车通常采用两种动力源, 动力源之一是传统发动机 (柴油机、汽油机或燃气轮机), 另一种动力源由电机电池组、燃料电池、飞轮等提供. 本文主要研究电机电池与发动机组合的混合动

力汽车. 与纯电动汽车相比, 混合动力电动汽车具有多方面的优越性. 混合动力电动汽车充分利用了发动机与电动机的工作特性, 通过协调发动机与电池/电机组的能源分配, 保证发动机工作在高效低能耗区, 还可利用电动机的再生制动, 回收尽可能多的能量. 因此, 混合动力电动汽车缓解了纯电动汽车电池储能有限、续航能力低的技术瓶颈. 另外, 混合动力电动汽车可避免在城区工况下频繁起停, 减少车辆怠速行驶工况, 可实现比传统内燃机汽车更优异的燃油经济性和清洁环保性. 同时, 混合动力汽车结构多样, 可通过对传统汽车结构的较小改动而实现混合动力车的设计, 大大降低了设计的复杂程度. 与传统汽车相比, 混合动力电动汽车可在保证行驶性能和不损失使用寿命的前提下, 通过合理的结构配置, 降低发动机等构件的重量及成本.

混合动力电动汽车包含了电能、热能、机械能之间的能量转换与控制关系, 其分类有多种方式. 根据混合动力电动汽车的混合程度可分为微混式混合动力、轻混式混合动力和全混式混合动力^[1]. 根据混合动力电动汽车的结构可分为串联式混合动力、并联式混合动力与混联式混合动力^[2], 而对于并联或混联式混合动力电动汽车, 根据动力源输出动力耦合方式的不同可分为转速耦合式混合动力、扭矩耦

收稿日期 2015-08-05 录用日期 2016-01-15
Manuscript received August 5, 2015; accepted January 15, 2016
国家自然科学基金 (61273107, 61174060, 51305065), 中央高校自主基金 (3132013334, DC201502010407) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61273107, 61174060, 51305065), Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132013334, DC201502010407)

本文责任编辑 苏宏业

Recommended by Associate Editor SU Hong-Ye

1. 大连理工大学 大连 116024 2. 大连民族大学 大连 116600 3. 大连海事大学 大连 116026

1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024 2. College of Electromechanical Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600 3. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026

合式混合动力、功率耦合或混合耦合^[3-4], 转速耦合其特点是动力装置的转速是解耦的, 发动机的转矩不可控, 而发动机的转速则可通过电机的转速进行控制; 转矩耦合方式的特点是发动机的转矩可控, 而发动机转速不可控, 往往通过电机转矩控制实现发动机转矩控制, 使发动机工作在最佳油耗曲线附近; 功率耦合也被称之为混合耦合, 指包含两种或以上扭矩耦合与转速耦合的耦合方式, 其发动机的转矩和转速均不受汽车工况的影响, 都是可控的. 无论哪种类型的混合动力电动汽车都是非常复杂的非线性系统, 对控制策略都提出了极高的要求. 能量管理系统作为混合动力电动汽车的核心, 其能量管理策略的优劣直接影响着混合动力电动汽车的可靠性、控制性、经济性和排放性能. 因此, 能量管理始终是混合动力电动汽车领域的重点研究课题, 其控制方法层出不穷. 早期的能量管理方法采用基于规则的控制方法^[2, 5-7], 后来广泛采用了基于动态规划的能量管理算法^[8-12]. 近年来, 各种先进智能化能量管理方法不断涌现, 代表性的方法包括实时等效油耗控制算法^[13-19]、预测模型控制算法^[20-25]、最优控制算法^[26-28] 以及模糊控制算法^[5, 29-41]、神经网络控制算法^[32-33, 42-43]、遗传算法^[15, 44-46] 等智能控制方法.

本文首先总结了研究人员从不同角度对混合动力电动汽车的能量管理问题所做的定义和描述, 然后对不同问题体系下的各种已有能量管理策略加以梳理分类研究, 深入分析了各种控制方法的特点及其存在的问题和不足, 并对未来推进混合动力电动汽车能量管理研究的发展方向和初步思路做了展望.

1 能量管理问题的描述

能量管理策略是混合动力电动汽车的核心技术, 是实现车辆燃油经济性和清洁环保性的关键. 只有在充分了解不同动力源工作原理及工作特性的基础上, 合理利用两种动力源的优势, 采取行之有效的控制策略才能达到预想的控制目标. 混合动力电动汽车能量管理策略对于能量的节省与效率的优化主要体现在以下几个方面:

- 1) 考虑电机电池组响应快、低速输出扭矩大; 而发动机响应慢、起动扭矩小等特点, 利用电机实现车辆的快速起步或加速, 保证发动机始终工作于高效率区, 弥补车辆功率峰值的波动需求, 实现发动机的高效率低排放;
- 2) 实现部分工况下的纯电动行驶, 使发动机在相应工况下实现零能耗零排放;
- 3) 汽车在下坡减速制动过程中利用电动机回收制动过程中的能量损耗对电池进行充电;
- 4) 利用电机的快速起停特性, 避免发动机经常

处在城市怠速工况下而产生高油耗与高排放.

由于混合动力电动汽车能量管理涉及了电能、热能、机械能等能量的转化与控制, 系统十分复杂, 并且其控制优化目标也各有不同. 因此, 大量的文献从不同的角度对混合动力电动汽车能量管理问题进行了定义与描述. 一类是基于规则的能量管理问题, 通常将问题描述为依据工程经验或实验数据确定发动机的工作区域, 通过电动机协调控制其工作模式, 制定规则以保证发动机在高效范围内工作. 另一类是将其描述为不同优化目标的能量管理问题. 大量的文献通过对两种动力的合理分配实现混合动力电动汽车的能量优化^[15, 27-28, 47-49], 也有部分文献将电池荷电状态 (State of charge, SOC) 作为优化函数的约束条件^[17, 21, 39] 或其中的加权项^[50-51], 还有的文献综合考虑了车辆的起动^[21, 30]、换挡^[9, 30, 39] 等瞬态过程的能量消耗以及车辆的驾驶性能^[23, 52]、质量^[26]、排放^[8, 53-55] 等因素, 将混合动力电动汽车能量管理问题描述为一个多目标综合优化问题.

一般地, 混合动力电动汽车的动态模型可表示为:

连续时间:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad 0 \leq t \leq T$$

离散时间:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad k = 1, 2, \dots, N$$

其能量管理问题可概括为如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{x, u} J(x, u) \\ \text{s. t. } G(x) \leq 0 \end{aligned}$$

其中, $x \in X$ 为系统的状态变量, 通常表示为电池的电量 SOC, $u \in U$ 表示控制变量, 通常为功率需求或转矩需求的分配比, $G(x)$ 表示约束条件, 比如, 电机的功率与转速限制、发动机转矩与转速限制、SOC 终值约束等.

能量管理问题的控制目标由成本函数 $J(x, u)$ 表示, 考虑不同影响因素或不同优化目标的成本函数具有不同的选取和表达方式, 下面概括介绍文献中常见的几种成本函数的能量管理优化问题的表述形式.

1.1 等效油耗的能量管理问题

文献 [13] 将能量管理问题表达为发动机的油耗与电机等效油耗成本之和, 即把等效油耗控制问题表述为如下优化问题:

$$\min_u J(t, u) = \Delta E_f(t, u) + s(t)\Delta E_e(t, u)$$

其中, $\Delta E_f(t, u)$ 为 Δt 时间内的发动机油耗, $\Delta E_e(t, u)$ 为 Δt 时间内的电能消耗, 分别由发动机与电机 Map 图获得, u 为控制转矩, $s(t)$ 为随时间变化的能量转化等效因子。

文献 [14] 为自适应等效油耗能量管理问题, 考虑在充、放电过程中其等效因子是不同的情况, 连续时间系统问题描述为

$$\begin{aligned} \min_{\{P_{ice}(t), P_{em}(t)\}} \quad & J = \dot{m}_{ice}(P_{ice}(t)) + \zeta(P_{em}(t)) \\ \text{s. t.} \quad & \text{If } P_{req}(t) \geq 0, \\ & P_{ice}^{opt}(t) = 0, P_{em}^{opt}(t) = P_{req}(t) \\ & \text{If } P_{req}(t) < 0, \\ & \begin{cases} P_{req}(t) = P_{ice}(t) + P_{em}(t) \\ \text{SOC}_{\min} < \text{SOC}(t) < \text{SOC}_{\max}, \forall t \\ 0 \leq P_{ice}(t) \leq P_{ice, \max}(t) \\ P_{em, \min}(t) \leq P_{em}(t) \leq P_{em, \max}(t) \end{cases} \end{aligned}$$

其中, $P_{req}(t)$ 为功率需求, $P_{ice}(t)$ 为发动机功率, $P_{em}(t)$ 表示电机功率, $\dot{m}_{ice}(P_{ice}(t))$ 为发动机的燃油消耗, $\zeta(P_{em}(t))$ 表示电能转化的等效油耗, $\text{SOC}(t)$ 为电池荷电状态。

1.2 考虑 SOC 的能量管理问题

考虑到电池容量和健康问题, 许多混合动力电动汽车能量管理问题都考虑了电池的 SOC. 文献 [39, 54–56] 引入了 SOC 约束条件, 即要求 SOC 工况循环终了值等于初始值; 文献 [14, 18, 21, 42] 将 SOC 约束在一定的范围内; 文献 [8, 22, 30, 40, 57] 将其转化为成本函数的加权项. 文献 [17] 除了考虑了 SOC 约束, 同时还考虑了 SOH (State of health) 问题, 其能量管理优化问题表述为

$$\begin{aligned} \min_u \quad & \int_0^T P_f(u, v, a, t) dt \\ \text{s. t.} \quad & \dot{x}_1(t) = \frac{-P_i(u(t))}{Q_0(t)} \\ & \dot{x}_2(t) = \frac{-|P_i(u(t))|}{(2 \cdot N(|P_i(u(t))|) \cdot Q_0(0))} \\ & x_1(0) = x_{1,0} \\ & x_2(0) = 1 \\ & x_1(T) \geq x_{1,0} \\ & x_2(T) \geq 0 \\ & x(t) \in X, x = [x_1, x_2]^T \\ & u(t) \in U \end{aligned}$$

其中, $P_f(u, v, a, t) dt$ 表示能量消耗率, $x_1(0)$ 、 $x_2(0)$ 与 $x_1(T)$ 、 $x_2(T)$ 分别表示 SOC 与 SOH 的初始与

终了值, $P_i(u(t))$ 表示电池输出功率, $x_{1,0}$ 与 $Q_0(0)$ 表示电池初始的 SOC 与容量, X 、 U 为状态量和控制量空间。

1.3 考虑排放的能量管理问题

随着环境污染的加剧, 车辆排放问题成了继能源问题之后的又一关注热点. 因此, 将排放纳入到成本函数形成燃油消耗与排放控制的折衷优化问题. 文献 [8, 46] 将能源管理问题表示为燃油消耗和排放指标构成的综合性能指标, 并考虑 SOC 状态, 形成如下多目标优化问题:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=0}^{N-1} [L(x(k), u(k)) + G(x(N))] \\ L(x(k), u(k)) &= fuel(k) + \mu NOx(k) + v PM(k) \\ G(x(N)) &= \alpha (\text{SOC}(N) - \text{SOC}_f)^2 \end{aligned}$$

其中, $fuel(k)$ 为第 k 时间段的燃油消耗, $NOx(k)$ 、 $PM(k)$ 为 NOx 、 PM 的排放量, SOC_f 为期望的荷电状态 SOC 的终值, μ 、 v 、 α 为加权因子, $L(x(k), u(k))$ 表示为燃油消耗与排放, $G(x(N))$ 表示 SOC 的变化影响。

1.4 考虑瞬时工况油耗的能量管理问题

车辆在城市工况下行驶, 经常处于起停、换挡等瞬态工况, 为了提高燃油经济性, 有必要考虑过渡工况对燃油消耗的影响. 文献 [9] 考虑了挡位切换对能耗的影响, 将优化问题表述为以价格表示的两种能源消耗:

$$\begin{aligned} \min_{\{i_k\}_{k=0,1,2,\dots,N-1}} \quad & G = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta Q_k + J_k \\ \Delta Q_k &= I_k U_k P_{r1} / 1000 / 3600 + b_{e,k} P_k P_{r2} / 3600 / \rho \\ J_k &= \lambda |i_{k+1} - i_k| \end{aligned}$$

其中, k 为时间步, i_k 表示挡位, P_{r1} 表示电价格 (元/kW·h), P_{r2} 表示燃油价格 (元/L), ρ 为燃油密度, P_k 表示电池功率, U_k 、 I_k 分别表示电池的端电压与电流, $b_{e,k}$ 为燃油消耗率, ΔQ_k 为以价格表示的两种能耗成本, J_k 为传动比变化的影响。

文献 [21] 考虑了车辆起动瞬时工况, 将成本函数定义为发动机油耗、电池 SOC 变化的等效油耗与发动机起停时的瞬时油耗之和:

$$\begin{aligned} J(k) &= \alpha_1 \int_{t_k}^{t_k+t_p} \dot{m}_f(t) dt + \alpha_2 [\text{SOC}(t_k) - \\ & \quad \text{SOC}(t_k + t_p)] + \alpha_3 [1 - key_on(t_k + t_p)] \\ \text{s. t.} \quad & \text{SOC}_{low,lim} < \text{SOC} < \text{SOC}_{up,lim} \end{aligned}$$

其中, $\dot{m}_f(t)$ 表示发动机的燃油消耗率, $key_on \in \{0, 1\}$ 代表发动机的状态, $\alpha_i, i = 1, 2, 3$ 为加权系数, t_k 为第 k 步时刻, t_p 为预测时间段, SOC_{up_lim} 与 SOC_{low_lim} 表示电池荷电状态 SOC 的上下界。

文献 [30] 不仅考虑了发动机稳态油耗、发动机起停时油耗, 还考虑了换挡时的油耗, 其成本函数选为发动机稳态油耗、发动机起停时油耗、换挡油耗、SOC 保持的油耗的总和, 即:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) + L_e(k) + L_b(k) + G(x(N))$$

其中

$$\begin{aligned} L(x(k), u(k)) &= P_e(k) \cdot g_e(k) \cdot t \\ L_e(k) &= \alpha(\text{sgn}(n_e(k+1)) - \text{sgn}(n_e(k))) \\ L_b(k) &= \beta|i(k+1) - i(k)| \\ G &= \gamma(\text{SOC}(N) - \text{SOC}(0))^2 \end{aligned}$$

$L(x(k), u(k))$ 为发动机稳态油耗, $L_e(k)$ 为发动机频繁起停时引起的油耗, $L_b(k)$ 为发动机换挡时油耗, $G(x(N))$ 为 SOC 维持的能耗, $P_e(k)$ 表示发动机的功率, $g_e(k)$ 表示燃油消耗率, t 表示间隔时长, $\text{sgn}n_e(k)$ 表示发动机的状态, $i(k)$ 表示 k 时刻的挡位, $\text{SOC}(0)$ 与 $\text{SOC}(N)$ 分别表示电池荷电量的初始值与终了值, α, β, γ 为加权系数。

1.5 考虑结构参数影响的能量管理问题

车辆的质量、结构对系统的能耗都会产生重要的影响。文献 [26] 通过分析不同的结构, 构造了混合动力电动汽车油耗与质量间的折衷权衡问题, 其成本函数为两者的加权和, 即

$$J = \min(F \cdot w_f + W \cdot w_s)$$

其中, F 为油耗, W 为重量, w_f, w_s 为各自的加权值。

文献 [39] 考虑了不同的挡位对能耗的影响, 保证整个工况循环下的油耗最少, 形成如下全局最优问题:

$$\min_{T_e(k), i(k)} J' = \sum_{k=0}^{N-1} D(T_e(k), i(k)) \cdot \Delta$$

$$D(T_e(k), i(k)) = \dot{m}(T_e(k), w_e(k), R(i(k)))$$

$$\text{s. t. } T'_{e_min}(k) \leq T_e(k) \leq T'_{e_max}(k), i(k) \in I(k)$$

$$x(N) - x(0) = \Delta\text{SOC} = 0$$

其中, Δ 为采样时间, $D(T_e(k), i(k))$ 为当发动机产生转矩为 $T_e(k)$ 、传动比为 $R(i(k))$ 时的油耗, $\dot{m}(T_e(k))$ 为当发动机转矩为 $T_e(k)$ 、转速为 $w_e(k)$

时的油耗, 由发动机 Map 图计算获得, $i(k)$ 为挡位, $T'_{e_max}(k)$ 与 $T'_{e_min}(k)$ 分别为发动机输出转矩的上下界, x 为电池电量。

文献 [23] 以优化车辆工作效率达到提高串联混合动力燃油经济性的目的, 定义了如下优化问题:

$$\eta_{sys}^*(P_{gen}) = \max_{\omega_{eng}, \tau_{eng}} \eta_{sys}(\omega_{eng}, \tau_{eng})$$

$$\text{s. t. } \eta_{gen} \left(\frac{\omega_{eng}}{k}, k\tau_{eng} \right) \omega_{eng} \tau_{eng} = P_{gen}$$

其中, $\eta_{sys}^*(P_{gen})$ 表示系统的优化目标, 即系统效率的最大值, η_{sys} 为系统效率, η_{gen} 表示电机效率, ω_{eng} 为发动机的转速, τ_{eng} 表示发动机的转矩, P_{gen} 为电机功率, k 为发动机与电机之间的传动比。

2 混合动力电动汽车的能量管理策略研究进展

混合动力电动汽车能量管理问题根据控制目标与考虑因素的不同, 有多种描述形式。控制策略从不同的角度, 也有多种划分方式: 根据结构形式^[2]分为串联式混合动力电动汽车控制策略、并联式混合动力电动汽车控制策略; 从控制策略的实现角度分为直接法与间接法^[1, 58]; 针对混合动力电动汽车能量优化的工作状态分为稳态优化控制策略与动态/实时优化控制策略^[58]; 从控制策略的控制方式可概括为基于规则的控制方法和基于优化的控制方法^[46]。一些文献从不同的角度对混合动力电动汽车能量管理策略进行概括整理^[1-2, 11, 53, 59-61]。文献 [58] 主要针对混联式混合动力车辆的不同复合方式和结构方案进行介绍, 并从发动机恒定工作点模式、发动机最优工作曲线模式、瞬时优化模式、全局优化模式对控制算法进行了分类介绍。文献 [2] 介绍混合动力电动汽车的发展、分类、对比与发展趋势, 重点讨论了自 2007 年来的控制策略的分类及各自的优缺点。文献 [1] 主要是根据混合动力电动汽车的混合程度, 对微混式混合动力、轻微式混合动力、全混式混合动力电动汽车的控制技术进行了概述。文献 [53] 讨论了混合动力车辆能量管理系统优化所涉及的主要问题, 主要从结构的角进行具体分析。文献 [60] 对 1990 年~2004 年混合动力车辆的相关文献进行研究, 综述了 HEV 的能量优化控制策略, 概括了混合动力能量优化问题的数学描述 (包括控制目标、控制器、约束条件、性能指标); 能量管理策略主要从静态优化、数字优化、分析优化、实时优化等方法进行概括。文献 [11] 综述了 1998 年~2014 年 HEV 与 Plug-in HEV 的控制算法。首先给出了能量管理问题的数学描述, 然后以时间顺序分别对于串联式、并联式、混联式以及 Plug-in 混合动力车辆的控制策略按照在线与离线的控制方法进行介绍, 分析其优缺点并讨

论未来研究方向与挑战. 文献 [61] 综述了 2012 年之前的 HEV/Plug-in HEV 的控制策略. 对其进行分类概括, 讨论了各种控制策略的优缺点. 无论混合动力电动汽车采用哪种结构形式, 无论是基于稳态特性还是动态特性, 无论采用直接法还是间接法, 其控制方法都是多种多样的, 各有各的特点, 存在着独特优势的同时也存在着一定的局限性, 因此也推动着混合动力电动汽车控制技术的发展, 不断地发现和解决问题的同时, 控制策略也不断地推陈出新. 本文从控制方式的角度进一步对目前的混合动力电动汽车能量管理策略进行概括梳理, 总结分析各种控制策略的特点, 整理其发展脉络. 图 1 为混合动力电动汽车能量管理策略划分.

2.1 基于规则的能量管理策略

由于基于规则的能量管理策略, 其控制简单, 易于实现, 因而成为被最早用于混合动力电动汽车的控制方法. 主要包含两种形式: 一种是基于确定规则的控制方法, 根据不同的转矩、车速与 SOC 条件 (如加速踏板、制动踏板指令) 或其效率 Map 图, 对电机或发动机工作状态进行模式划分, 制定规则进行切换控制; 另一种是基于模糊逻辑的控制策略, 针对混合动力电动汽车具有多变量、非线性和时变的特点, 结合模糊控制的优势, 建立状态变量与状态变量变化率的隶属度函数, 确定模糊控制规则进行能量分配与 SOC 的控制.

2.1.1 基于确定规则的能量管理策略

基于确定规则的能量管理策略是基于负荷平衡的概念^[5, 23, 62], 其主要思想是通过电动机协调转移发动机的工作点, 使其尽量工作在高效率区间内, 以获得较高的燃油经济性. 发动机的工作区域通常由理论分析和工程经验来界定. 比如可以根据发动机的静态工作效率曲线 Map 图, 将发动机的工作区域进行划分, 通过控制变量 (功率需求、车速、加速信号、电池 SOC 等) 判断发动机的工作区域, 并选择混合动力电动汽车的工作模式, 使车辆运行在高效

区域内. 混合动力电动汽车的工作模式通常分为^[7]: 纯电动模式、发动机模式、混合模式、再生制动模式、充电模式. 纯电动模式: 混合动力电动汽车在电池高 SOC 时起步或低速行驶等低负荷工况下, 关闭发动机, 由电动机单独驱动; 发动机模式: 车辆在中、高速中等负荷工况下, 发动机处于高效工作区, 此时关闭电动机, 由发动机单独驱动; 混合模式: 当车辆在加速、爬坡等大负荷工况时, 为保证发动机高效行驶, 由电动机辅助发动机共同驱动车辆; 再生制动模式: 当车辆处于减速制动时, 驾驶员踩下制动踏板, 产生负的功率需求情况下, 且在不影响车辆制动安全性的前提下, 尽可能的吸收制动能量; 充电模式: 当电池电量 SOC 低于某一设定值 (如文献 [47] 中设为 42%) 时, 车辆进入充电模式, 由发电机通过发电机对电池进行充电, 以保证电池电量维持在正常范围内, 从而防止电池的过度消耗损害电池的使用寿命.

文献 [63] 其规则的制定主要是通过将发动机工作区域分为高负荷、中负荷和中低负荷区, 结合驾驶员油门踏板开度和开度变化率计算当前需求功率确定相应的工作模式. 具体规则为当需求功率处于发动机高负荷区域, 采用混合模式, 将发动机控制在高效率工作区域, 不足的动力由电动机提供; 若处于中负荷区域则为发动机模式, 所需动力由发动机单独提供; 如果处于中低负荷区域则进入纯电动模式或行车充电模式. 仿真研究了不同结构的混合动力电动汽车与传统内燃机车辆燃油经济性与排放性能的对比, 结果表明两者均有较大幅度的提高. 文献 [64] 根据不同的工况, 应用逻辑阈值方法对并联混合动力进行控制. 通过设定阈值, 限制发动机和电池工作区间, 控制发动机工作在高效率区间提供要求的力矩, 而电动机作为载荷调节装置. 当车辆需要大扭矩输出时, 电动机参与驱动; 当需要小扭矩输出时, 视电池的荷电状态 SOC, 由电动机单独驱动或将电动机作为发电机工作, 吸收发动机剩余力矩并对电池进行充电, 使电池的 SOC 维持在合理范围内, 结合

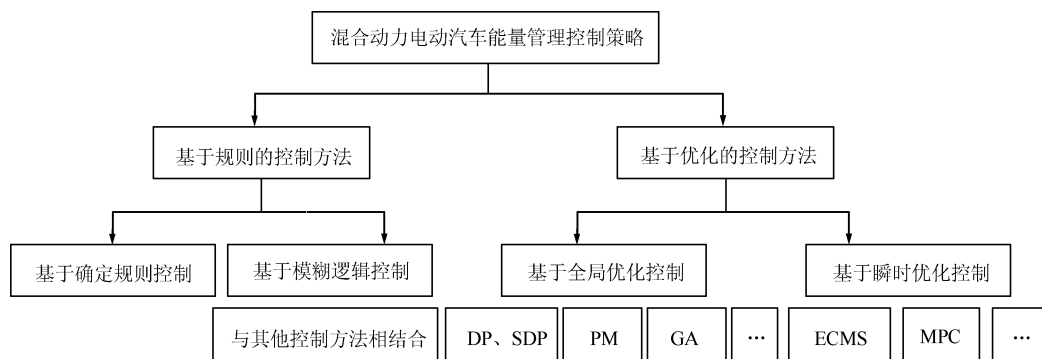


图 1 混合动力电动汽车能量管理策略划分

Fig. 1 Energy management strategies overview for HEV

车速与 SOC 对于工况进行划分与控制,具体包含了启动或制动、低速行驶、正常行驶、全负荷行驶以及减速滑行等基本工况,在不同工况下根据车速和 SOC 阈值调节控制,在保证动力性的同时,特定工况下的百公里油耗相较传统车辆降低了 37%。文献 [65] 针对混联式混合动力电动汽车的不同工况的能量管理策略进行研究,在分析混联式混合动力系统的工作原理的基础上,以系统综合效率最大化为主要控制目标,将车辆的运行工况归纳为充电工况、放电工况和制动工况。对于充电工况和放电工况,以系统综合效率最大为主要控制目标建立了能量管理系统模型;而制动工况则采用了基于再生制动能量回收最大为控制目标的能量管理策略,相对传统的基础车型其燃油消耗降低 36.95%。文献 [47] 基于功率平衡方程建立控制规则对转矩进行分配,使发动机工作在高效区域,并对 SOC 进行控制,防止发动机频繁启停,通过与未安装 ISG (Integrated starter generator) 的混合动力相比较,燃油经济性可提高 9.3%。文献 [66] 从变速器结构角度,通过多个行星轮系形成多模式电子可变变速器的不同工作模式,通过管理切换工作模式,使发动机处在高效低能耗区域,即从传动比的角度,解耦发动机,使其可在整个工作过程保持在高效区域。文献 [67] 将扭矩作为最主要的控制变量,以内燃机稳态效率特性 Map 图为基础,综合考虑了驾驶员的需求以及混合动力汽车中多个部件的特性,对内燃机和电机输出功率合理分配,以提高系统的效率。文献 [48] 通过 Map 图使混合动力汽车动力效率保持在高效率区域进行实时控制,考虑各构成部分的效率(发动机、发电机、电池、整流器、转化器)形成动力系的整体效率,实现混合动力电动汽车燃油经济性的改善。其特点在于:电池效率的考虑区别于以往工作(假设电池的充放电在相同的功率水平进行等效是不够准确的),而是分别给出了不同的充电和放电效率;通过离线计算得到控制 Map 图,以功率需求和 SOC 为输入,按照获得的控制 Map 图对功率进行实时分配控制,既减少了计算负担,便于实时控制,又考虑了电池 SOC 的约束,利于长期运行,防止发动机的频繁启停,保证电池的健康使用,通过与采用恒温控制策略、功率跟随控制策略的性能对比,燃油经济性提高可达到 20%。

基于确定规则的能量管理策略,往往是基于工程师的经验、工作模式的划分和静态的能耗效率 Map 图来制定规则,思路简单易懂,计算量小,方法易于实现;但无法适应不同工况变化和实际的动态变化的需求,适应性不强,无法实现最优控制。为了寻求性能的优化和工况的实时适应性,在此基础上开始将模糊控制结合到规则控制中。

2.1.2 基于模糊逻辑规则的能量管理策略

考虑到混合动力电动汽车能量管理系统包含多个子系统,且具有非线性时变性的特点,应用模糊逻辑规则对其进行管理控制。基于模糊逻辑规则的能量管理策略,利用模糊控制方法具有强鲁棒性和实时的优点去处理非线性和不确定性问题。基于模糊逻辑规则对混合动力电动汽车的工作模式和功率进行划分,通过对车速、SOC、转矩、功率等模糊化,以实现混合动力电动汽车能量管理系统的合理控制,提高车辆的整体性能。

文献 [26] 应用模糊逻辑规则的控制方法,基于经验确定隶属度函数与规则,针对不同混合结构的燃料电池混合动力车辆进行研究,探讨更适合节约能耗的结构组合。基于模糊控制具有较强的鲁棒性、且简单易于实现的特点,文献 [23] 分别采用两个模糊控制器分别对 SOC 和发动机转矩进行模糊控制,保证发动机工作在高效率区,提高了燃油经济性与排放性能;文献 [31] 采用了分层结构,应用模糊控制对发动机转矩进行控制,使其保持在高效工作区从而提高燃油经济性。文献 [30, 35] 基于动态规划 (Dynamic programming, DP) 的优化结果建立模糊控制规则用于液力混合动力汽车的能量管理,通过模糊控制规则划分了 5 种工作模式。但是模糊逻辑控制策略和逻辑阈值控制策略一样,也是依靠工程经验来制定控制规则,难以确保控制策略的最优,所以很多文献探索将模糊控制规则与其他控制方法相结合的策略。例如,文献 [19] 将模糊控制与等效油耗最小 (Equivalent consumption minimization strategy, ECMS) 相结合,对 ECMS 中的等效因子进行模糊控制,从而提高重型混合动力电动汽车的燃油经济性。文献 [29] 结合遗传算法对隶属度函数和模糊集进行划分,对转矩进行模糊控制。文献 [36] 采用粒子群算法对模糊控制器的隶属度函数与模糊规则对转矩进行优化控制。文献 [37] 采用两个模糊控制器分别对混合动力电动汽车电池的 SOC 和转矩进行模糊控制。文献 [32-33] 利用学习矢量 (Learning vector quantization, LVQ) 神经网络与模糊逻辑控制对驾驶环境、状态进行识别。其中包含了 4 个子模块,即驾驶信息提取器 (Driving information extractor, DIE)、道路类型辨识器 (Roadway type identifier, RTI)、驾驶趋势辨识器 (Driving trend identifier, DTI)、驾驶员风格辨识器 (Driver style identifier, DSI)。首先通过 DIE 从驾驶循环工况提取特征信息 (47 个特征参数),再由 RTI 对交通拥堵等级分类 (9 类),由 (47 行 × 9 列) 数据对 LQV 神经网络进行训练学习,得到驾驶状态 (道路及拥堵状况);DTI 用来进行循环工况识别,DSI 对驾驶员风格进行识别。将上述信息综合为模

糊转矩分配器的输入, 建立模糊规则, 对功率分配实现能量管理与电量维持策略, 其特点在于对于驾驶状态多种情况(包括道路类型、交通拥堵、行驶趋势、驾驶员风格等)的提取, 考虑了不同的驾驶状态对油耗或功率分配的影响, 并兼顾 SOC 状态, 建立模糊规则进行能量管理. 文献 [34] 将车辆工作模式划分为纯电动模式、发动机模式、混合模式、再生制动模式、滑行模式、常规制动共 6 种模式, 应用遗传算法与模糊规则控制器相结合, 实现模糊控制参数与控制规则的匹配.

综上, 基于模糊逻辑规则的能量管理策略不依赖于系统模型的精确性, 具有较强的鲁棒性和推理性, 更加适用于复杂的混合动力非线性系统的控制. 但其仍然需要依靠经验规则来达到精确的控制效果, 也无法保证控制最优, 往往通过结合其他智能控制算法以达到控制性能的提高与改善. 为了达到全局最优的控制效果, 更多的研究开始关注并探索基于优化的能量管理控制策略.

2.2 基于优化方法的能量管理策略

基于优化的能量管理策略通过定义能量成本函数结合约束条件, 对其进行最小化实现控制目标的优化. 通常将混合动力电动汽车的油耗作为其控制目标形成约束条件下的单目标控制, 也有将排放、电池电量的变化、驾驶性能等同时作为控制目标的多目标优化控制. 对于基于优化的能量管理策略, 为了达到更为理想和适用于混合动力电动汽车的能量管理策略, 尝试并探索了各种控制方法. 目前基于优化的能量管理策略可分为两类, 一类是基于静态数据表或者历史数据, 在特定的工况下进行能量优化控制的全局最优能量管理方法; 另一类是基于车辆的实时状态或当前参数进行的在线控制, 通常可以保证局部或瞬时最优的能量管理方法.

2.2.1 基于全局最优的能量管理策略

基于全局最优的能量管理策略中最具代表性的有动态规划 DP 控制方法、庞特里亚金最小值原理控制方法 (Pontryagin's minimum principle, PMP)、遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 以及与其他智能控制方法结合的能量管理控制方法. 基于全局最优的能量管理方法通常是针对特定工况循环进行能量分配控制, 而车辆的燃油经济性往往又非常依赖于工况循环的状况, 因此具有一定的局限性, 在实际控制中应用效果也不尽理想.

1) 基于动态规划的能量管理方法

目前, 混合动力电动汽车稳态过程的能量管理已经较为成熟, 尤其是特定工况下的能量管理算法, 最具有代表性的为基于动态规划的能量管理方法. 动态规划方法是求解决策过程中的最优优化问

题的数学方法, 20 世纪 50 年代初由美国数学家 Bellman^[68] 在研究多阶段决策过程的优化问题时提出, 把多阶段过程转化为一系列单阶段问题, 利用各阶段之间的关系, 逐个求解的优化方法. DP 算法自 2000 年被用于混合动力电动汽车能量管理^[69], 且被公认为是较为理想的混合动力能量管理方法, 可实现全局优化, 且能够较好地提高燃油经济性. 文献 [8] 根据控制目标及系统模型将混合动力能量管理问题描述为一定约束条件下的能量成本函数, 采用 DP 算法进行反推动态求解. 文献 [9] 应用 DP 算法, 在约束条件中增加了变速器传动比切换约束, 防止实际过程中出现的频繁换挡现象. 文献 [12] 采用 DP 算法对混合动力电动汽车进行自适应巡航优化控制实现巡航安全与油耗协调控制.

DP 算法的应用往往是针对已知的特定循环工况, 需要提前掌握未来的循环工况信息, 而且存在计算量大、耗时长久的“维数诅咒”, 无法实现实时控制, 因此限制了该算法的实际应用. 但由于其不可否定的控制效果, 常常将其用于常见或固定的驾驶路线的优化管理, 如混合动力公交车辆、混合动力的通勤车辆, 同时也被作为用于评估其他控制算法的优劣的标准. 文献 [64] 将 DP 优化结果作为评价控制性能的标准用于评估博弈论在混合动力电动汽车能量管理中的控制效果. 文献 [14, 18] 对混合动力电动车辆的 ECMS 算法与 DP 算法进行对比研究. 文献 [55] 应用修正的 DP 算法和二次规划算法进行控制并对比分析车辆电力系统的能量管理策略. 文献 [51] 对 HEV 通勤路线能量管理系统进行优化, 在没有车辆行驶循环工况先验信息情况下, 从公交历史数据信息辨识通勤路线, 结合能量管理, 在服务器上应用 DP 预先计算最优控制解.

尽管 DP 算法在实际中的应用受到了限制和影响, 仍有大量的研究致力于 DP 算法的改进与探索, 主要体现在以下三方面: 1) 计算时间的减少、降低内存需求. 文献 [70] 应用近似 DP 算法用于并联混合动力电动汽车以解决 DP 算法计算量大、计算时间长的问题. 文献 [71] 对 HEV 能量管理 DP 子问题求解解析解, 针对 DP 算法计算量高的问题, 采用局部线性近似和二次样条逼近得到转矩分配的 DP 子问题优化解析解, 从而减少计算量, 降低内存需求. 文献 [72] 采用三次样条近似 DP 算法用于 HEV 能量管理问题, 在对燃油经济性几乎不产生影响的基础上大大降低了对存储空间的需求. 2) 对未来工况信息的识别与预测. 文献 [5, 28] 应用基于机器学习算法 (神经网络算法) 对驾驶环境 (包括道路类型、交通拥堵、行驶趋势、驾驶员风格等) 进行训练学习进行预测, 从 DP 算法中学习并模拟 DP 算法进行发动机转速控制与功率的优化分配. 文献 [42]

用于液力混合动力控制,采用 DP 算法获得的数据进行网络控制器训练.文献 [54] 对不同结构(串联式、并联式、混联式)的 HEV 进行建模,通过电机功率、发动机功率与转矩平衡关系,对电机功率进行等效控制并引入发动机状态参数和能效能量转换系数形成系统能量成本函数进行最小化设计.从混合动力节能原理的角度进行模式划分(起停、再生制动、纯电、混合、纯发动机、充电模式)与能量管理,并模拟 DP 算法,因此不需要预测未来信息,且可以实现计算量较小.3) DP 算法的改进或与其他技术相结合.文献 [73] 提出了一种随机动态规划算法(Stochastic dynamic programming, SDP),通过对油耗、排放以及电池的电量进行加权得到成本函数,利用离线迭代的方法求解线性规划最优解.文献 [74] 提出了一种基于 SDP 的 HEV 能量管理方法,首先通过马尔科夫过程表示功率需求以获得不确定的工况信息,形成无限优化问题(即将工况通过功率需求与速度进行离散化,由马尔科夫过程建立其概率分布,形成优化问题),基于 SDP 对功率分配 Map 图进行优化获得优化控制律,实现实时控制,提高燃油经济性.文献 [10] 对于由燃料电池、飞轮、电机组构成的混合动力电动汽车分别采用 4 个独立的控制器(一个方向控制器、一个侧偏调节器、两个速度控制器)进行控制.控制器采用神经网络自适应控制器(Neural adaptive controller, NAC)进行速度控制、转向跟踪与侧偏调节;自适应动态规划控制器(Adaptive dynamic programming, ADP)用于能量管理.首先建立非线性系统模型,将拉格朗日约束优化问题转化为等效无约束优化问题,即广义二次型,应用线性 ADP 控制器进行控制.

2) 基于庞特里亚金最小值原理的能量管理方法

庞特里亚金最小值原理 PMP,也被称为极大值原理是 20 世纪 50 年代中期苏联学者 Pontryagin 等提出的^[75],它是用于解决控制与状态受约束的最优控制问题的一种方法.它克服了变分法无法对受约束的控制变量和目标函数泛函求极值的缺陷,是变分法的延伸与推广.混合动力电动汽车能量优化问题可以归结为含有约束的时变非线性系统最优控制问题,由混合动力电动汽车数学模型得到 Hamiltonian 方程,基于一定的假设条件,庞特里亚金最小值原理能够获得全局最优解,与动态规划 DP 算法相比,大大减少了计算量,更适于实时控制.因此,继 DP 算法之后,对庞特里亚金最小值原理在混合动力电动汽车能量管理系统中的应用也进行了大量研究与探索.

文献 [56, 76] 为基于 PMP 的 HEV 实时优化控制,旨在保证能量管理的全局最优性的前提下,尽量减小算法的计算负担,实现实时控制.首先由数学模

型推导计算得到 Hamiltonian 方程,通过适当的假设条件(电池参数与 SOC 的关系),保证 PMP 全局最优,最后与 DP 算法对比,燃油经济性十分接近,略低 0.07%,而 PMP 的算法计算负担小,可实现实时控制.文献 [57, 77-78] 考虑了混合动力电动汽车电池寿命的问题,采用 PMP 算法进行能量管理控制.其中,文献 [78] 采用了 PMP 算法对自动变速器并联 HEV 的能量管理系统进行控制,并与 DP 算法对比研究,其优化结果非常接近,燃油消耗略高于 0.4%,且 PMP 控制其车辆换挡与车速相关,控制更为有效,算法的计算时间更短,可节约 77% 的时间,更便于实时控制.文献 [17] 将 PMP 算法用于 ECMS 进行燃油经济性控制,并且着重考虑了 SOC 与电池健康状态问题,与未考虑电池状态相比较,其电池寿命可延长 17%,综合电池使用寿命从而降低成本.同样,文献 [79] 将 PMP 与 ECMS 结合,将 PMP 用于并联 HEV 的实时控制,以重型并联 HEV 的油耗与 SOC 保持作为控制目标,对等效因子采用比例积分控制,进行在线调节实时控制,仿真结果与 DP 算法十分接近,油耗约增加 1.3%,接近全局最优.文献 [80] 将 DP 算法与 PMP 结合用于混合动力电动汽车等效能量优化,PMP 用于功率环即内环的控制,DP 算法用于换挡指令的外环控制.其特点体现在针对发动机的高效工作点与变速器档位(传动比)之间关系,对档位选择进行优化,并综合考虑了发动机 Start-Stop 过程的油耗,与 DP 算法相比较,其计算效率在保证不损失精度的前提下提高了 171 倍;与采用标准换挡策略(即未考虑 Start-Stop 过程的算法)对比,燃油经济性提高可达 26.8%.

3) 基于遗传算法的能量管理方法

遗传算法是在自然选择和自然遗传学机理基础上进行的自适应概率性迭代搜索算法,能够快速实现全局收敛,找到最优值,适于混合动力电动车辆能量管理优化,易于形成多目标优化问题,提高综合性能.但是往往也需要提前预知驾驶工况循环,且计算量并未显著降低,因此,其实际应用仍存在一定的限制,但也涌现了一定的文献进行研究探索.文献 [46, 52] 是将问题转化为多目标优化问题,应用遗传算法实现性能的综合优化.文献 [46] 通过建模构造发动机油耗、SOC 与排放性能多目标优化问题,利用变域方法(对其约束进行不等式变换,引入协调因子,在优化顺序与优化目标值之间进行平衡)对优化目标进行优先等级划分,并将其转化为非线性规划问题,通过遗传算法进行多性能权衡折衷优化,与基于规则的控制和权重加权控制相比较,燃油经济性提高约 0.1%,排放性能可提高 5%~10%.文献 [52] 主要针对能量管理系统中组件的规格和参数对于油耗和排放性能以及传动系优化设计的影响,

应用遗传算法设计了多目标双层优化的控制策略。首先采用不同的主观驾驶性能指数对驾驶性能进行估计形成多目标优化问题, 根据燃油消耗与驾驶性能确定系统最佳参数 (电机/发电机组参数优化、内燃机与电池参数优化、变速器参数优化), 进而确定能量优化的控制轨迹。其独特之处在于将动力总成参数优化设计融入到混合动力能量管理, 防止了不良的加减速。而文献 [81] 将 HEV 能量管理问题描述为含约束条件的优化问题, 采用混合的遗传细菌觅食算法 (Genetic-based bacteria foraging, GBF), 引入时间加权平方误差积分进行性能评价, 通过与文献 [82] 中的遗传算法 (GA)、细菌觅食优化算法 (Bacteria foraging optimisation, BFO)^[83] 对比研究。结果表明, 采用 GBF, 其燃油经济性提高约 2%, 排放也有所下降。另外, 该方法不需要掌握驾驶工况循环, 只依赖于行驶范围, 更易于实现。

2.2.2 基于瞬时优化的能量管理方法

随着实时/在线能量管理控制方法的研究, 产生了瞬时优化的思想。其主要出发点就是要保证当前时间能量管理过程的能量消耗最少或功率损耗最小, 基于发动机的最佳工作曲线 (油耗、功率、效率 Map 图) 得到瞬时最优工作点, 控制混合动力各个状态变量进行动态能量分配, 使发动机、电动机工作在瞬时最优状态点。基于瞬时优化的能量管理方法是针对车辆瞬时工况的能量流进行优化控制, 不需要提前了解车辆的未来行驶信息, 不受特定工况循环的制约, 计算量相对较小, 易于应用实现。但是, 瞬时优化并不等于整体最优, 所以无法保证全局最优。常用的优化方法有基于等效油耗最小 ECMS 的能量管理方法、基于模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 的能量管理方法及基于其他智能控制的能量管理方法。

1) 基于等效油耗最小的能量管理方法

等效燃油消耗最小控制策略 ECMS 定义在某一瞬时工况下将电动机的能量消耗折算成发动机的燃油消耗, 即等效油耗, 引入等效因子建立每一瞬时的总的油耗成本函数, 也可以通过加权因子同时对排放进行优化形成多目标函数, 进行优化求解, 因此也被称为基于成本的能量管理策略。基于等效油耗最小的能量管理方法不仅可以实现实时控制, 还可以对车辆的动力性、燃油经济性及排放性能进行折衷优化。但一般不考虑电池 SOC 的动态变化, 而是基于发动机在同样的条件下对电池电量进行补偿的假设下进行的, 也无法保证全局最优。

文献 [13] 取消了对车辆驾驶循环工况已知的假设, 从能量管理实时优化的角度, 采取了 ECMS 控制, 并且引入新的燃油和电能的等效方法, 即考

虑了充电和放电过程的区别, 分别采用不同的等效因子进行优化求解。首先详细的介绍了 ECMS 的思想, 将电机电池能量消耗转化为发动机能耗成本, 即等效能耗, 即对每一离散时间总的成本油耗函数引入等效因子, 最后通过在不同的工况下与内燃机汽车进行比较, 燃油经济性提高了 30%~50%。文献 [18] 针对 Plug-in HEV 采用了 DP 算法与两种模式 (即纯电动模式与混合模式) 的 ECMS 控制策略进行对比研究。结果表明, ECMS 相较 DP 算法其燃油经济性略低, 但不需要工况先验知识, 具有更强的实时性。文献 [50] 在仿真软件 ADVISOR 中的混合动力电动汽车默认控制策略的基础上改进了实时控制策略, 即求成本函数的和, 并对油耗、等效油耗 ECMS 进行加权, 结合排放形成多目标控制问题, 考虑温度修正及 SOC 变化对能耗的影响, 对优先级加权与各目标加权, 与混合动力电动汽车 ADVISOR 中的默认控制策略相比, 以牺牲较小的燃油经济性 (约 1.4% 的油耗) 换取排放性能的提升 (NO_x 、 PM 排放量分别减少 23% 与 13%)。文献 [16] 为串联混合动力的能量管理 ECMS, 通过发动机的油耗与排放 Map 图进行归一化, 确定发动机/电机工作点, 进行功率分配。与传统内燃机车辆相对比, 实现油耗降低约 8% 和 CO_2 排放量减少 14.58%。文献 [17] 将庞特里亚金最小值原理 PMP 用于 ECMS 进行燃油经济性控制, 并且考虑了 SOC 与电池健康状态 SOH 问题, 尤其是 SOH 与燃油经济性的权衡, 以较低的油耗换取更长的电池寿命, 降低综合成本。由于 ECMS 算法往往无法适应实时工况的变化, 进而提出了基于自适应等效油耗最小的能量管理方法 AECMS。文献 [14] 采用 AECMS, 根据历史与当前驾驶工况信息估算等效因子, 周期更新控制参数, 其燃油经济性相对于传统内燃机车辆提高约 21.9%。文献 [15] 对比研究了三种控制算法, 即基于规则、AECMS 与 H_∞ 算法, 综合对比各方面特点, AECMS 计算量少, 燃油经济性好, 控制效果更为理想。

2) 基于模型预测的能量管理方法

基于模型预测的能量管理方法 (Model predictive control, MPC) 通过在线辨识优化车辆动态参数, 将整个驾驶循环的燃油经济性的全局最优控制转化成预测区域内的局部优化控制, 通过不断地滚动优化, 更新预测车辆下一时间域的运行状态或控制参数从而获得优化结果。模型预测控制方法具有较强的鲁棒性, 适于不确定性、非线性动态系统的控制, 因此适用于 HEV 能量管理; 另外, 模型预测控制还可以与其他智能算法相结合, 例如引入神经网络、人工智能、模糊控制等理论可以获得更加优异的控制性能。如文献 [21] 主要是考虑混合动力电动

汽车在瞬态(如怠速、起动瞬态)过程的燃油消耗,采用 MPC 算法根据驾驶员意图对转矩分配进行预测控制.在保证驾驶性能的同时提高燃油经济性,通过对比得出 MPC 比 PID 控制具有更好的燃油经济性.文献 [20] 是针对超级电容-燃料电池混合动力电动汽车中的缺氧和空压机的喘振问题,将其转化为能量管理控制的约束条件,采用模型预测控制对燃料电池与超级电容的需求电流进行误差估计和状态估计预测,从而实现混合车辆的能量优化控制.文献 [84] 采用基于随机模型预测控制算法对需求功率进行预测,针对并联式混合动力汽车的转矩分配问题进行了研究并建立马尔科夫模型,将随机模型预测控制与动态规划相结合,以油耗最小化为目标进行滚动优化控制,通过与逻辑阈值方法对比,燃油经济性提高约 7%.文献 [22] 提出了用于混合动力汽车能量分配的线性时变 MPC 与非线性 MPC 控制.通过与 PSAT 软件默认算法对比,燃油经济性均有所提高,且非线性 MPC 性能提高更明显.文献 [23] 采用 MPC 对串联混合动力功率进行控制,使发动机工作在高效区域以提高车辆效率.通过与负载跟随控制、功率平衡控制对比,燃油经济性分别提高了 5.7% 与 4.6%.

3) 用于能量管理的其他智能控制方法

此外,用于能量管理控制方法还有神经网络控制、博弈论等.

基于神经网络的能量管理:采用神经网络对难以精确描述的复杂的非线性对象进行建模、控制、推理、优化计算等,具有很强的信息处理能力和函数逼近能力,它具有自组织、自学习的功能等,常与其他控制方法相结合用于控制器参数的优化.文献 [5, 28] 针对混合动力电动汽车的循环工况未知,且驾驶环境对于其能量消耗的重要影响,将神经网络控制结合到混合动力电动汽车能量管理系统以实现其智能控制.通过神经网络强大的学习能力,通过当前驾驶环境信息训练学习,对驾驶环境进行了较为全面的预测(即道路情况、交通信息、驾驶模式等),并学习 DP 算法实现对混合动力电动汽车的功率分

配进行实时最优控制.文献 [42] 应用 DP 算法获得的数据进行网络控制器训练,对液力混合动力汽车进行优化控制.文献 [10] 为神经网络与其他算法相结合用于混合动力能量管理.文献 [43, 85] 采用神经网络对车辆的路况信息进行学习预测,结合优化算法从而提高混合动力电动汽车的燃油经济性能.

基于博弈理论的能量管理:博弈论(Game theory, GT),又称对策论,用于混合动力电动汽车能量管理,通常将发动机与电动机间的能量分配作为具有竞争或对抗性质的博弈行为,基于 Feedback Stackelberg equilibria 原理,应用 GT 对其进行控制.文献 [64] 采用 GT 算法实现了对混合动力电动汽车的能耗和排放问题的综合优化控制,并且从实际应用的角度,摆脱了工况循环已知的约束,便于实时控制.该算法首先将混合动力车的运行状态与动力系统看成博弈两成员,成本函数包含油耗、排放、SOC 偏离,基于 Feedback Stackelberg equilibria 原理,采用博弈理论的控制策略,确定 GT-maps,判别工作模式,进行扭矩分配,并与通过 DP 优化和测功机校准后的电池最佳输出 Map 图策略对比,获得了更好的燃油经济性、排放性和 SOC 保持性,且不依赖于工况循环,具有较强的鲁棒性;同时考虑了内存、计算速度、复杂性、驾驶性能等问题,更符合实时控制应用.

3 问题与展望

综上,对混合动力电动汽车能量管理策略的发展进行概括分析,目前混合动力电动汽车能量管理策略的影响因素包括:对目标函数的选择与确定、实际的驾驶工况循环或对工况的预测方法(比如高速公路、城市工况下效率是不同的)、混合动力的混合度(电机与发动机提供的功率比)、动态变化或瞬态过程对油耗的影响、控制方法的选择等.其局限性主要体现在对于整个驾驶循环工况信息的预测,驾驶意图的判断,实时控制计算量大,无法实现全局最优等问题,具体概括如表 1.

表 1 能量管理策略性能对比

Table 1 Performance comparison of various energy management strategies

性能	确定规则	模糊逻辑规则	全局优化	瞬时优化
优点	算法简单、易于实现	不依赖于模型的精确度,具有较强的鲁棒性与适应性	具有理想的优化性能,能够实现全局优化,常用于其他算法的性能评估	通常不受循环工况的制约,计算量少,可用于实时控制,能够实现瞬时能量最优
缺点	依赖于经验和静态数据,不能适应工况变化和负载的动态变化,无法保证最优控制	模糊规则的制定依赖于经验,无法保证全局最优	通常都依赖于工况循环,算法的计算量较大,不利于实时控制,因此具有一定的局限性	无法保证全局最优

针对上述混合动力能量管理系统存在的问题与挑战,考虑今后的发展与努力的方向,总结了以下几个方面。

3.1 基于结构、原理改善系统性能

1) 从制动能量回收的角度,对再生制动控制策略进行改进。混合动力电动汽车再生制动约贡献总能效的 35%^[86-88]。因此,从改善再生制动控制的角度,可以进一步节约能源,尤其是 Plug-in 混合动力电动汽车,可以利用电网(如家用 220 V 电源)进行充电,也可利用夜间用电低峰期通过电网对车辆进行车辆充电,探索更为优化的能量管理控制策略将更加有利于提高车辆的燃油经济性和排放性。

2) 减少瞬时工况的能量损耗。混合动力电动汽车的行驶循环工况对其燃油经济性和排放性能具有重要的影响。瞬态工况在城市汽车工况中占有很高的比例,从对欧洲、美国、日本以及我国上海、北京、武汉等城市循环工况的统计分析来看,加速所占时间比例为 20%~45%,大部分在 30% 以上,减速时间 20%~31%,停车频率最高时,两次停车平均间隔时间为 33 s^[89-92],改善瞬时工况能耗对于车辆燃油经济性具有更大的空间。

3) 从车辆的动力总成与参数匹配的角度改善混合动力电动汽车的整体效率,从而达到提高燃油经济性的目的。混合动力电动汽车由发动机与电机组及传动系统构成,根据燃油消耗与驾驶性能,从动力总成,包括电机/发电机组、内燃机与电池、变速器规格与参数进行匹配与优化可进一步提升整体效率,优化性能。

3.2 实时路况信息的获取与预测

能量管理控制策略对燃油经济性与排放性能的影响与循环工况具有较强的依赖性,不同工况下的燃油经济性是不同的,且多数算法往往需要假设整个驾驶循环工况已知,这在实际中是无法实现的,因此,需要与一些技术相结合进行获取与预测。

1) 与智能交通系统相结合,利用先进的传感器、导航^[93]及 GPS 等技术获得实时路况的信息;

2) 利用智能的控制策略,如神经网络、机器学习等方法^[24,36,85]对路况、实时信息进行预测;

3) 利用智能交通系统,获取路况与交通状态,也可实现对车队的协调控制。

3.3 能量管理方法的改进

1) 针对目前的混合动力电动汽车能量管理方案的假设条件、约束条件和控制方法进行改善,提高控制策略的适应性和实际应用性。例如 DP 算法要求工况循环已知的假设与计算负担重的限制;ECMS 通常假设等效因子为固定值,且基于等效燃油消耗

是在发动机同样工作点进行电量补偿的;电池充放电效率相同等假设。

2) 综合现有的各种能量管理策略的优势,实现复合控制,以提高系统的综合性能。考虑全局最优算法的良好优化性能、模糊逻辑算法的适应性与鲁棒性、实时优化算法的实时性等,探索不同控制算法的互相协同与融合,取长补短从而实现更加优异的控制效果。

3) 开发并探索更加适用于混合动力电动汽车的能量管理策略,以获得更好的控制效果。通过更加深入地了解与掌握混合动力电动汽车各构成之间的能量关系和工作特性,从不同的角度提炼问题,寻求更为适用的能量管理策略。

References

- 1 Chau K T, Chan C C. Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(4): 821-835
- 2 Salmasi F R. Control strategies for hybrid electric vehicles: evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, **56**(5): 2393-2404
- 3 Wu Wei-Li. Design and Application Study of Power Coupling System for Plug-In Hybrid Electric Vehicle [Master dissertation], South China University of Technology, China, 2012
(吴为理. 插电式混合动力汽车动力耦合系统设计及应用研究 [硕士学位论文], 华南理工大学, 中国, 2012)
- 4 Ehsani M, Gao Y M, Emadi A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design* (2nd edition). New York: CRC Press, 2009.
- 5 Murphey Y L, Park J, Chen Z H, Kuang M L, Masrur M A, Phillips A M. Intelligent hybrid vehicle power control — Part I: machine learning of optimal vehicle power. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(8): 3519-3530
- 6 Somayajula D, Meintz A, Ferdowsi M. Designing efficient hybrid electric vehicles. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2009, **4**(2): 65-72
- 7 Anbaran S A, Idris N R N, Jannati M, Aziz M J, Alsofyani I. Rule-based supervisory control of split-parallel hybrid electric vehicle. In: *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Energy Conversion*. Johor Bahru: IEEE, 2014. 7-12
- 8 Lin C C, Peng H, Grizzle J W, Kang J M. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, **11**(6): 839-849
- 9 Guo L L, Ren L N, Xiang Y, Gao B Z, Chen H. Performance analysis of a PHEV under optimal control strategy. In: *Proceedings of the 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Beijing, China: IEEE, 2013. 1-6
- 10 Saeks R, Cox C J, Neidhoefer J, Mays P R, Murray J J. Adaptive control of a hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2002, **3**(4): 213-234
- 11 Malikopoulos A A. Supervisory power management control algorithms for hybrid electric vehicles: a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(5): 1869-1885

- 12 Luo Y G, Chen T, Zhang S W, Li K Q. Intelligent hybrid electric vehicle ACC with coordinated control of tracking ability, fuel economy, and ride comfort. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(4): 2303–2308
- 13 Sciarretta A, Back M, Guzzella L. Optimal control of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, **12**(3): 352–363
- 14 Musardo C, Rizzoni G, Guezennec Y, Staccia B. A-ECMS: an adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. *European Journal of Control*, 2005, **11**(4–5): 509–524
- 15 Pisu P, Rizzoni G. A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(3): 506–518
- 16 Sezer V, Gokasan M, Bogosyan S. A novel ECMS and combined cost map approach for high-efficiency series hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, **60**(8): 3557–3570
- 17 Ebbesen S, Elbert P, Guzzella L. Battery state-of-health perceptive energy management for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(7): 2893–2900
- 18 Marano V, Tulpule P, Stockar S, Onori S, Rizzoni G. Comparative Study of Different Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles, SAE Technical Paper 2009-24-0071, Detroit, USA, 2009.
- 19 Zhao D Z, Stobart R, Dong G Y, Winward E. Real-time energy management for diesel heavy duty hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, **23**(3): 829–841
- 20 Vahidi A, Stefanopoulou A, Peng H. Current management in a hybrid fuel cell power system: a model-predictive control approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(6): 1047–1057
- 21 Yan F J, Wang J M, Huang K S. Hybrid electric vehicle model predictive control torque-split strategy incorporating engine transient characteristics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(6): 2458–2467
- 22 Borhan H, Vahidi A, Phillips A M, Kuang M L, Kolmanovsky I V, Di Cairano S. MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, **20**(3): 593–603
- 23 Di Cairano S, Wei L, Kolmanovsky I V, Kuang M L, Phillips A M. Power smoothing energy management and its application to a series hybrid powertrain. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(6): 2091–2103
- 24 Zeng X R, Wang J M. A parallel hybrid electric vehicle energy management strategy using stochastic model predictive control with road grade preview. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, **23**(6): 2416–2423
- 25 Di Cairano S, Bernardini D, Bemporad A, Kolmanovsky I V. Stochastic MPC with learning for driver-predictive vehicle control and its application to HEV energy management. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, **22**(3): 1018–1031
- 26 Delprat S, Lauber J, Guerra T M, Rimaux J. Control of a parallel hybrid powertrain: optimal control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, **53**(3): 872–881
- 27 Won J S, Langari R, Ehsani M. An energy management and charge sustaining strategy for a parallel hybrid vehicle with CVT. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**(2): 313–320
- 28 Xia Chao-Ying, Zhang Cong. Real-time optimization control algorithm of energy management strategy for hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(3): 508–517 (夏超英, 张聪. 混合动力系统能量管理策略的实时优化控制算法. *自动化学报*, 2015, **41**(3): 508–517)
- 29 Vural B, Dusmez S, Uzunoglu M, Ugur E, Akin B. Fuel consumption comparison of different battery/ultracapacitor hybridization topologies for fuel-cell vehicles on a test bench. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, **2**(3): 552–561
- 30 Moghbeli H, Halvaei N A, Fallahi N. Fuzzy energy control strategy of through-to-road hybrid electric vehicle. In: Proceedings of the 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2014. 1660–1665
- 31 Murphey Y L, Park J, Kiliaris L, Kuang M L, Masrur M A, Phillips A M, Wang Q. Intelligent hybrid vehicle power control — Part II: online intelligent energy management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, **62**(1): 69–79
- 32 Ma Xiang-Hua, Ye Yin-Zhong. Study on genetic-fuzzy control strategy for PHEV drive system. In: Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China: IEEE, 2013. 7575–7579 (马向华, 叶银忠. 并联式混合动力汽车驱动系统遗传模糊控制策略研究. 见: 第 32 届中国控制会议. 西安, 中国: IEEE, 2013. 7575–7579)
- 33 Sun H, Jiang J H, Wang X. Torque control strategy for a parallel hydraulic hybrid vehicle. *Journal of Terramechanics*, 2009, **46**(6): 259–265
- 34 Bathae S M T, Gastaj A H, Emami S R, Mohammadian M. A fuzzy-based supervisory robust control for parallel hybrid electric vehicles. In: Proceedings of the 2005 IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion. Chicago, USA: IEEE, 2005.
- 35 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. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, **54**(3): 925–934
- 36 Won J S, Langari R. Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle — Part II: torque distribution, charge sustenance strategies, and performance results. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, **54**(3): 935–953
- 37 Mustafa R, Schulze M, Eilts P, Küçükay F. Intelligent Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Vehicle, SAE Technical Paper 2014-01-1909, Detroit, USA, 2014.
- 38 Wei Z, Xu J, Halim D. HEV energy management fuzzy logic control based on dynamic programming. In: Proceedings of the 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Montreal, QC: IEEE, 2015. 1–5
- 39 Wu J. Fuzzy energy management strategy for plug-in HEV based on driving cycle modeling. In: Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing, China: IEEE, 2014. 4472–4476
- 40 Zhang Yi, Liu He-Ping, Wu Yuan-biao. Multi-objective control strategy for parallel HEV using fuzzy logic. *Journal of Chongqing University*, 2013, **36**(2): 75–84 (张毅, 刘和平, 伍元彪. 并联混合动力汽车模糊多目标控制策略. *重庆大学学报*, 2013, **36**(2): 75–84)
- 41 Denis N, Dubois M R, Desrochers A. Fuzzy-based blended control for the energy management of a parallel plug-in hybrid electric vehicle. *IET Intelligent Transport Systems*, 2015, **9**(1): 30–37

- 42 Taghavipoura A, Foumani M S, Boroushaki M. Implementation of an optimal control strategy for a hydraulic hybrid vehicle using CMAC and RBF networks. *Scientia Iranica*, 2012, **19**(2): 327–334
- 43 Sun C, Hu X S, Moura S J, Sun F C. Velocity predictors for predictive energy management in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, **23**(3): 1197–1204
- 44 Wagner J R, Dawson D M, Liu Z Y. Nonlinear air-to-fuel ratio and engine speed control for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2003, **52**(1): 184–195
- 45 Fiengo G, Glielmo L, Vasca F. Control of auxiliary power unit for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(6): 1122–1130
- 46 Zhang Y, Liu H P, Guo Q. Varying-domain optimal management strategy for parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, **63**(2): 603–616
- 47 Adhikari S, Halgamuge S K, Watson H C. An online power-balancing strategy for a parallel hybrid electric vehicle assisted by an integrated starter generator. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(6): 2689–2699
- 48 Shabbir W, Evangelou S A. Real-time control strategy to maximize hybrid electric vehicle powertrain efficiency. *Applied Energy*, 2015, **135**: 512–522
- 49 Lukic S M, Emadi A. Effects of drivetrain hybridization on fuel economy and dynamic performance of parallel hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, **53**(2): 385–389
- 50 Johnson V H, Wipke K B, Rausen D J. HEV Control Strategy for Real-Time Optimization of Fuel Economy and Emissions, SAE Technical Paper 2000-01-1543, Detroit, USA, 2000.
- 51 Larsson V, Johannesson M L, Egardt B, Karlsson S. Commuter route optimized energy management of hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(3): 1145–1154
- 52 Boehme T J, Frank B, Schori M, Jeansch T. Multi-objective optimal powertrain design of parallel hybrid vehicles with respect to fuel consumption and driving performance. In: Proceedings of the 2014 European Control Conference. Strasbourg, France: IEEE, 2014. 1017–1023
- 53 Ceraolo M, di Donato A, Franceschi G. A general approach to energy optimization of hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, **57**(3): 1433–1441
- 54 Kessels J T B A, Koot M W T, van den Bosch P P J, Kok D B. Online energy management for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, **57**(6): 3428–3440
- 55 Koot M, Kessels J T B A, de Jager B, Heemels W P M H, van den Bosch P P J, Steinbuch M. Energy management strategies for vehicular electric power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, **54**(3): 771–782
- 56 Kim N, Cha S, Peng H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, **19**(5): 1279–1287
- 57 Tang L, Rizzoni G, Onori S. Energy management strategy for HEVs including battery life optimization. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, **1**(3): 211–222
- 58 Cordiner S, Galeani S, Mecocci F, Mulone V, Zaccarian L. Torque Setpoint tracking for parallel hybrid electric vehicles using dynamic input allocation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, **22**(5): 2007–2015
- 59 Yang Hong-Liang, Chen Quan-Shi. Views on the combined hybrid system operating strategies. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2002, **19**(1): 103–107
(杨宏亮, 陈全世. 混联式混合动力汽车控制策略研究综述. 公路交通科技, 2002, **19**(1): 103–107)
- 60 Sciarretta A, Guzzella L. Control of hybrid electric vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, **27**(2): 60–70
- 61 Panday A, Bansal H O. A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle. *International Journal of Vehicular Technology*, 2014, **2014**: Article ID 160510
- 62 Markel T, Wipke K. Modeling grid-connected hybrid electric vehicles using ADVISOR. In: Proceedings of the 16th Annual Battery Conference on Applications and Advances. Long Beach, CA: IEEE, 2001. 23–29
- 63 Dextreit C, Kolmanovsky I V. Game theory controller for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, **22**(2): 652–663
- 64 Zhao Zi-Liang, Liu Dong-Qin, Liu Ming-Hui, Li Jun, Wang Qing-Nian. Study on control strategy and simulation for parallel hybrid electric vehicle. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(12): 13–18
(赵子亮, 刘东秦, 刘明辉, 李骏, 王庆年. 并联混合动力汽车控制策略与仿真分析研究. 机械工程学报, 2005, **41**(12): 13–18)
- 65 Shu Hong, Liu Wen-Jie, Yuan Jing-Min, Gao Yin-Ping. Optimization of energy management strategy for a parallel-series HEV. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, **40**(3): 31–35
(舒红, 刘文杰, 袁景敏, 高银平. 混联型混合动力汽车能量管理策略优化. 农业机械学报, 2009, **40**(3): 31–35)
- 66 Kim J, Kim T, Min B, Hwang S, Kim H. Mode control strategy for a two-mode hybrid electric vehicle using electrically variable transmission (EVT) and fixed-gear mode. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, **60**(3): 793–803
- 67 Tong Yi, Zhang Jun-Zhi, Ouyang Ming-Gao. Torque management strategy for hybrid electric vehicles. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003, **43**(8): 1134–1137
(童毅, 张俊智, 欧阳明高. 混合动力汽车扭矩管理策略. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **43**(8): 1134–1137)
- 68 Bellman R E. *Dynamic Programming*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1957.
- 69 Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G. Optimal energy management in series hybrid electric vehicles. In: Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago, USA: IEEE, 2000. 60–64
- 70 Johannesson L, Egardt B S. Approximate dynamic programming applied to parallel hybrid powertrains. In: Proceedings of the 17th IFAC World Congress. Seoul, Korea: IFAC, 2008. 3374–3379
- 71 Larsson V, Johannesson L, Egardt B. Analytic solutions to the dynamic programming subproblem in hybrid vehicle energy management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, **64**(4): 1458–1467
- 72 Larsson V, Johannesson L, Egardt B. Cubic spline approximations of the dynamic programming cost-to-go in HEV energy management problems. In: Proceedings of the 2014 European Control Conference. Strasbourg, France: IEEE, 2014. 1699–1704

- 73 Ko J, Ko S, Son H, Yoo B, Cheon J, Kim H. Development of brake system and regenerative braking cooperative control algorithm for automatic-transmission-based hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, **64**(2): 431–440
- 74 Lee H, Cha S W, Kim H, Kim S J. Energy Management Strategy of Hybrid Electric Vehicle Using Stochastic Dynamic Programming, SAE Technical Paper 2015-01-0019, Detroit, USA, 2015.
- 75 Pontryagin L S, Boltyanskii V G, Gamkrelidze R V, Mishchenko E F. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. New York: Interscience Publishers, 1962.
- 76 Xu K, Qiu B, Liu G B, Chen Q S. Energy management strategy design of plug-in hybrid electric bus based on Pontryagin's minimum principle. In: Proceedings of the 2014 IEEE Conference Expo Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing, China: IEEE, 2014. 1–6
- 77 Tang L, Rizzoni G, Onori S. Optimal energy management of HEVs with consideration of battery aging. In: Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing, China: IEEE, 2014. 1–6
- 78 Yuan Z, Teng L, Sun F C, Peng H. Comparative study of dynamic programming and Pontryagin's minimum principle on energy management for a parallel hybrid electric vehicles. *Energies*, 2013, **6**(4): 2305–2318
- 79 Liu T, Zou Y, Liu D X, Sun F C. Real-time control for a parallel hybrid electric vehicle based on Pontryagin's minimum principle. In: Proceedings of the 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific. Beijing, China: IEEE, 2014. 1–5
- 80 Ngo V, Hofman T, Steinbuch M, Serrarens A. Optimal control of the gearshift command for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(8): 3531–3543
- 81 Samanta C, Panigrahi S P, Panigrahi B K. Genetic-based bacteria foraging to optimise energy management of hybrid electric vehicles. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2014, **4**(3): 53–61
- 82 Fang L C, Qin S Y, Xu G, Li T L, Zhu K M. Simultaneous optimization for hybrid electric vehicle parameters based on multi-objective genetic algorithms. *Energies*, 2011, **4**(12): 532–544
- 83 Das S, Biswas A, Dasgupta S, Abraham A. Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis, and applications. *Foundations of Computational Intelligence*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009, **203**: 23–55
- 84 Zhao Han, Wu Di. A research on the control strategy of a parallel HEV based on stochastic model predictive control. *Automotive Engineering*, 2014, **36**(11): 1289–1294 (赵韩, 吴迪. 基于随机模型预测控制的并联式混合动力汽车控制策略研究. *汽车工程*, 2014, **36**(11): 1289–1294)
- 85 Feng T H, Hu Y Q, Yang L. A neural network model to calculate the energy demand of the vehicle based on traffic features. In: Proceedings of the 17th International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou, China: IEEE, 2014. 299–303
- 86 Yaegashi T, Sasaki S, Abe T. Toyota hybrid system: its concept and technology. In: Proceedings of the 1998 FISITA World Automotive Congress. Paris, France, 1998. F98TP095
- 87 Yamaguchi K, Maroto S, Kobayashi K, Kawamoto M, Miyaishi Y. Development of a New Hybrid System-Dual System, SAE Technical Paper 960231, Detroit, USA, 1996.
- 88 Panagiotidis M, Delarammatikas G, Assanis D. Development and Use of a Regenerative Braking Model for a Parallel Hybrid Electric Vehicle, SAE Technical Paper 2000-01-0995, Detroit, USA, 2000.
- 89 Du Chang-Qing. Transient Process Control Technology on Parallel Hybrid Electric Powertrain [Ph.D. dissertation], Wuhan University of Technology, China, 2009 (杜常清. 车用并联混合动力系统瞬态过程控制技术研究 [博士学位论文], 武汉理工大学, 中国, 2009)
- 90 Gao Y M, Ehsani M, Miller J M. Hybrid electric vehicle: overview and state of the art. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2005. 307–316
- 91 Meisel J. An Analytic Foundation for the Toyota Prius THS-II Powertrain with a Comparison to a Strong Parallel Hybrid-Electric Powertrain, SAE Technical Paper 2006-01-0666, Detroit, USA, 2006.
- 92 Bridges J, Warnaby C E, Stannard D, Styles J, Ellims M. Frameworks for Power and Systems Management in Hybrid Vehicles: Challenges and Prospects, SAE Technical Paper 2006-21-0005, Detroit, USA, 2006.
- 93 Jurik T, Cela A, Hamouche R, Natowicz R, Reama A, Niculescu S I, Julien J. Energy optimal real-time navigation system. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2014, **6**(3): 66–79

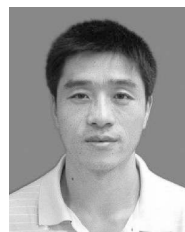


赵秀春 大连理工大学博士研究生。2006 年获得东北大学机械工程与自动化学院机械电子专业硕士学位。主要研究方向为车辆控制技术。

E-mail: zxc_xiu@163.com

(ZHAO Xiu-Chun Ph.D. candidate at the School of Control Science and Engineering, Dalian University of

Technology. She received her master degree from Northeastern University in 2006. Her main research interest is vehicle control technology.)



郭戈 大连海事大学教授。1998 年获得东北大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为网络控制理论, 程控制, 车辆协同控制, 移动机器人控制。本文通信作者。

E-mail: geguo@yeah.net

(GUO Ge Professor at Dalian Maritime University. He received his Ph. D.

degree from Northeastern University in 1998. His research interest covers networked control system theory, process control, vehicular cooperative control, and mobile robot control. Corresponding author of this paper.)