

DOI: 10.7652/xjtuxb201903018

新型双电机行星耦合 PHEV 多目标补偿 能量优化策略研究

徐兴^{1,2}, 徐新铮¹, 王峰^{1,2}, 汪少华¹, 周之光³

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 江苏大学汽车工程研究院, 212013, 江苏镇江;
3. 奇瑞汽车股份有限公司动力总成技术中心新能源研发支持部, 241009, 安徽芜湖)

摘要: 针对某新型双电机行星耦合插电式混合动力汽车(PHEV),以燃油经济性为研究目标,为改善以等效因子为核心的等效燃油瞬时消耗最小策略(ECMS)的控制效果,结合多动力源之间在行星齿轮机构中的耦合机理,建立油电等效因子自适应瞬态 ECMS 算法(A-ECMS),在此基础上进一步引入车辆初始荷电状态(SOC)和行驶里程对油电等效因子的影响,根据不同驾驶条件对等效因子进行离线遗传优化,建立基于等效因子优化 Map 图的遗传优化 ECMS 能量管理策略(GA-ECMS)。进行了仿真与硬件在环试验,仿真结果表明:相比于传统 ECMS 以及 A-ECMS,本文提出的 GA-ECMS 算法下车辆百公里燃油消耗量分别降低了 6.5%和 3.4%;硬件在环试验结果与仿真结果趋势一致,表明了所制定的能量管理策略的有效性和可行性,从而可为建立不同初始 SOC、不同行驶里程下 PHEV 功率分配策略提供理论基础。

关键词: 插电式混合动力汽车;行星耦合;能量管理策略;多目标补偿因子;遗传算法
中图分类号: U462.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)03-0125-10

Optimal Energy Management for Dual Motor Planetary Coupled PHEV Based on Multi-Objective Compensation Factor

XU Xing^{1,2}, XU Xinzheng¹, WANG Feng^{1,2}, WANG Shaohua¹, ZHOU Zhiguang³

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;
2. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. New Energy
Development Department of Powertrain Technology Center, Chery Automobile Co. Ltd., Wuhu, Anhui 241009, China)

Abstract: To improve the control effect of the instantaneous equivalent fuel consumption minimization strategy (ECMS), taking fuel economy of a new type dual-motor planetary coupled plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) as the research target, and based on the coupling mechanism between multiple power sources in planetary gear mechanism, an adaptive ECMS algorithm for the equivalent factors is presented. On this basis, the influences of vehicle initial state of charge (SOC) and driving mileage on the fuel-electricity equivalent factor is further studied, and the off-line genetic optimization of the equivalent factor is performed to obtain the Map of the compensation value for fuel-electricity equivalent factor. The genetically optimized adaptive ECMS energy management strategy based on the Map of the optimal equivalent factor is proposed. Hardware-in-loop simulation experiments are conducted and the results show that

compared with the traditional ECMS and A-ECMS, the proposed GA-ECMS algorithm reduces fuel consumption by 6.5% and 3.4%, respectively. The results of HiL experiment and simulation are basically consistent, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed energy management strategy. It also provides a theoretical basis for making power allocation strategy for different vehicle initial SOC and driving mileage.

Keywords: plug-in hybrid electric vehicle; power split planetary gear system; energy management strategy; multi-objective compensation factor; genetic algorithm

与传统混合动力汽车相比,行星排式功率分流混合动力系统凭借其结构紧凑、能够灵活实现发动机扭矩解耦和转速解耦的双重效果等优点^[1-3],已广泛应用于深度混合动力汽车,对提高燃油经济性具有积极意义。

混合动力汽车开发的实质是通过部件工况的改善和效率的提高来实现整个系统性能的优化,是基于系统结构概念上的创新。根据部件种类、数量和连接关系,可将 PHEV 动力系统分为串联型、并联型和混联型 3 种基本结构类型^[4-5]。其中,混联型 PHEV 动力传动系统的布置形式包含串联式和并联式的特点,即功率既可以像串联式流动,又可像并联式流动,Pruis HEV 就属于这种结构^[6-8]。能量管理策略作为 PHEV 控制策略的核心,对提高燃油经济性和整车动力学有着重要的作用,目前主要包括规则法^[9-10]、等效油耗最小策略^[11-15]、动态规划法^[16-18]等。Zhang 等研究了基于规则的 Charge-Depleting-Charge-Sustaining (CD-CS) 模式控制策略,先通过 CD 模式消耗电池的电量到设定值,然后处于电量维持(CS)模式,虽然基于规则的优化方法简单易行,但是优化效果一般^[9-10]。Finesso 等研究的等效油耗最小策略则将全局优化问题转换为瞬时优化问题,使用哈密顿函数表示油耗与协同状态变量乘以电耗的加和,在每一时刻对哈密顿函数求取最小值,进而得到各动力源的最优分配,较易实现在线优化的功能^[11-15]。邓涛等采用学习向量量化(LVQ)神经网络设计了工况识别器,将对应典型工况的最优等效因子作为当前优化输入,建立了自适应 ECMS 策略,相比于传统 ECMS 提高了一定的燃油经济性^[19-20]。Pourabdollah 等利用动态规划算法计算出一系列最优的控制序列使目标函数达到最小值,但该算法需要提前预知工况信息,难以用于实际控制中^[16]。综上所述,行星齿轮机构作为混联式 PHEV 的耦合机构易实现多输入输出,实现多能源最佳匹配等诸多优点,因而成为 PHEV 动力耦合机构的首选。同时,等效燃油消耗最小控制策略(EC-

MS)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,进行优化求解,虽无法保证全局最优,但计算量小,可以实现实时控制,因此 ECMS 的瞬时优化算法使在线优化成为可能^[21-26]。

为兼顾 PHEV 动力性和经济性的双重需求,本文分析了多动力源之间的耦合机理,建立油电等效因子自适应瞬态 ECMS 模型,综合考虑初始荷电状态(SOC)和行驶里程对油电等效因子的影响,并根据不同驾驶条件离线优化等效因子,建立基于等效因子优化 Map 图的 ECMS 能量管理策略;搭建行星排式功率分流混合动力系统整车与控制器的硬件在环试验平台,并进行控制器及控制算法的实时性和有效性验证。

1 双电机行星耦合 PHEV 系统结构

本文研究的系统结构如图 1 所示,该新型双电机(MG)行星耦合混合动力系统由单行星排和双离合三档变速机构组成,其中发动机与太阳轮相连,辅助电机与齿圈相连,主电机通过三档变速机构和离合器与行星架相连,在兼顾 PHEV 动力性和经济性的双重需求的同时,又能够实现发动机的扭矩解耦和转速解耦的双重效果。

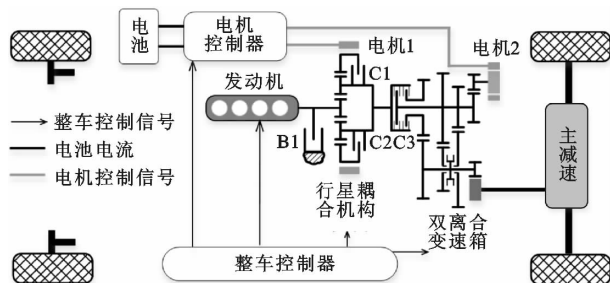


图 1 新型双电机混合动力系统结构示意图

如图 1 所示,通过对离合器 C1、C2、C3 和制动器 B1 的控制,可以使整个机构有不同的连接方式,实现多种不同的工作模式。具体工作模式如表 1

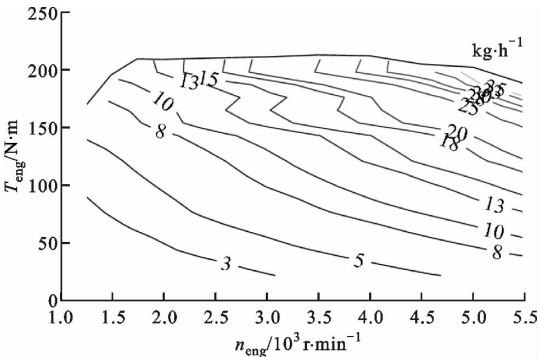


图 3 发动机燃油消耗 Map 图

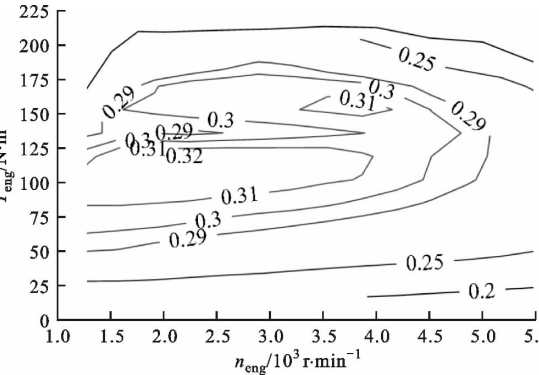


图 4 发动机效率曲线图

机来实现系统的功率分流,根据两个电机的台架试验数据,建立了电机的转速和转矩与其工作效率之间的准稳态查表模型。

定义电机油门开度为 θ_e ,电机输出转矩的计算公式为

$$T_e = \theta_e T_{e\max} \quad (6)$$

式中: θ_e 在 $-1 \sim 1$ 之间; T_e 为当前电机实际转矩; $T_{e\max}$ 为当前电机最大转矩。

电机效率特性曲线如图 5、图 6 所示。

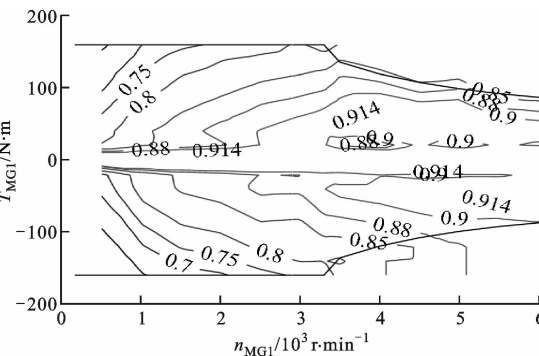


图 5 电机 1 效率特性曲线

2.3 动力电池模型

动力电池的充放电过程具有复杂的非线性特性,且受温度影响很大,涉及到的特征参数包括电池

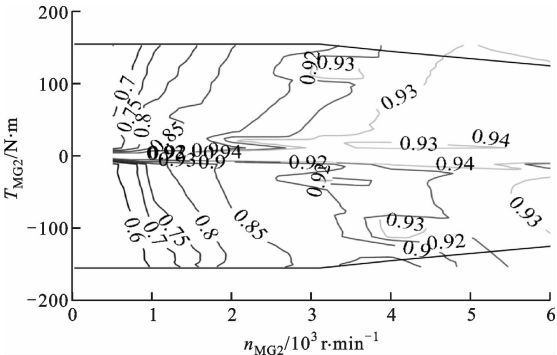


图 6 电机 2 效率特性曲线

的电压、工作电流、内阻、荷电状态 SOC 以及温度^[7],所建立的电池模型必须能够准确反映其工作过程中的动力学特性各个特征参数的关系。本文采用应用最为广泛的内阻模型(Rint 模型)来模拟电池工作特性,该内阻模型由一个等效电压源串联一个内阻来模拟,终端电压为动力电池的实际输出电压,其等效电路如图 7 所示。

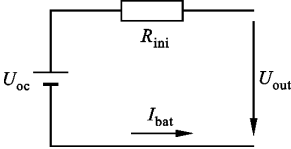


图 7 动力电池 Rint 模型等效电路图

动力电池的 SOC 定义为剩余容量 Q_r 与全电荷容量 $Q_{\max}$ 的比值

$$f_{\text{SOC}} = \frac{Q_r}{Q_{\max}} \quad (7)$$

$$Q_r = Q_{\max} - Q_u \quad (8)$$

$$Q_u = (1 - f_{\text{SOCini}})Q_{\max} + \frac{1}{3600} \int_0^t I_{\text{bat}} dt \quad (9)$$

式中: Q_u 为动力电池已经消耗掉的电池容量; f_{SOCini} 为电池初始 SOC。

仿真模型中电池单体的开路电压 U_{oc} 和内阻 R_{ini} 均通过试验数据建立二维准稳态模型查表求得

$$U_{oc} = f_u(t_{\text{bat}}, f_{\text{SOC}}) \quad (10)$$

$$R_{ini} = \begin{cases} f_{\text{Rdis}}(t_{\text{bat}}, f_{\text{SOC}}), & I_{\text{bat}} \geq 0 \\ f_{\text{Rchg}}(t_{\text{bat}}, f_{\text{SOC}}), & I_{\text{bat}} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: f_u 表示由电池温度和 SOC 到电池单体开路电压的映射; t_{bat} 为电池温度; f_{Rdis} 、 f_{Rchg} 分别表示由电池温度、SOC 到电池放电内阻、充电内阻的映射关系。因此,电池包的开路电压 U_{ocp} 和内阻 R_{ocp} 为

$$\left. \begin{aligned} U_{ocp} &= U_{oc} K_{\text{tot}} \\ R_{ocp} &= R_{ini} K_{\text{tot}} \\ K_{\text{tot}} &= K_{\text{mod}} K_{\text{num}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: K_{tot} 为等效串联电池单体总数; K_{mod} 为动力电池模块数; K_{num} 为每个模块中串联的电池单体数。

根据上式和等效电路图可以推出

$$\begin{aligned} U_{\text{out}} &= U_{\text{ocp}} - I_{\text{bat}} R_{\text{ocp}} \\ U_{\text{ocp}} I_{\text{bat}} &= P_{\text{bat}} + I_{\text{bat}}^2 R_{\text{ocp}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: U_{out} 为动力电池输出电压; P_{bat} 为动力电池输出功率。

3 双电机行星耦合 PHEV 能量管理策略设计

3.1 基于 SOC 跟随的自适应 A-ECMS

能量管理策略

针对所研究的双电机行星耦合 PHEV 系统,其能量管理可以看作一个带约束的最优控制问题,由于电池 SOC 必须保持在期望范围内,对于 PHEV 汽车, f_{SOC} 通常在 0.3~0.9 之间,那么能量管理策略的优化目标可转化为解决以下优化问题

$$\min_{\{P_{\text{MG}j}, j=1,2, P_{\text{eng}}\}} \int \dot{m}_f(\tau) d\tau \quad (14)$$

其中约束条件为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{req}}(t) &= P_{\text{eng}}(t) + P_{\text{MG1}}(t) + P_{\text{MG2}}(t) \\ P_{\text{MG}j\text{min}}(\omega_{\text{MG}j}(t)) &\leq P_{\text{MG}j}(t) \leq P_{\text{MG}j\text{max}}(\omega_{\text{MG}j}(t)) \\ \omega_{\text{MG}j\text{min}} &\leq \omega_{\text{MG}j}(t) \leq \omega_{\text{MG}j\text{max}} \\ 0 &\leq \omega_{\text{eng}}(t) \leq \omega_{\text{MG}j\text{max}}, \quad j=1,2 \\ P_{\text{inmax}}(t) &\leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{outmax}}(t) \\ f_{\text{SOCmin}} &\leq f_{\text{SOC}}(t) \leq f_{\text{SOCmax}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{req}}(t)$ 为总需求功率; P_{MG1} 、 P_{MG2} 分别是电机 1、电机 2 的机械功率; P_{MG1max} 、 P_{MG1min} 分别是电机 1 所能提供的最大、最小功率, P_{MG2max} 、 P_{MG2min} 分别是电机 2 所能提供的最大、最小功率,并且其与 ω_{MG1} 和 ω_{MG2} 相关; P_{inmax} 、 P_{outmax} 分别是电池当前所能提供的最大充电、放电功率; P_{bat} 为电池功率,由下式决定

$$\begin{aligned} P_{\text{bat}} &= \frac{P_{\text{MG1}}}{\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b1}} \eta_{\text{M}}} \frac{1 + \text{sgn}(P_{\text{MG1}})}{2} + \\ &P_{\text{MG1}}(\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b2}} \eta_{\text{M}}) \frac{1 - \text{sgn}(P_{\text{MG1}})}{2} + \\ &\frac{P_{\text{MG2}}}{\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b1}} \eta_{\text{M}}} \frac{1 + \text{sgn}(P_{\text{MG2}})}{2} + \\ &P_{\text{MG2}}(\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b2}} \eta_{\text{M}}) \frac{1 - \text{sgn}(P_{\text{MG2}})}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中 η_{pe} 为电气效率, η_{b1} 、 η_{b2} 分别是电池充电、放电效率, η_{M} 为电机的机械效率。当 $x \leq 0$ 时, $\text{sgn}(x) = -1$; 当 $x > 0$ 时, $\text{sgn}(x) = 1$ 。

由于 ECMS 策略是将电机消耗的能量转换为

等效燃油消耗量,将一个全局优化问题转换为求解每一时刻的燃油消耗最小问题,解出瞬时油耗最小时功率的最优分配,所以优化目标函数为

$$\min_{\{P_{\text{MG}j}, j=1,2, P_{\text{eng}}\}} \dot{m}_{f,\text{eq}}(t) \quad \forall t \quad (17)$$

$$\dot{m}_{f,\text{eq}}(t) = \dot{m}_{f,\text{eng}}(t) + f_{\text{pen}} \dot{m}_{f,\text{ESS}}(t) \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} f_{\text{pen}} &= \frac{1 - x_{\text{SOC}}^3}{2} - 0.0001 I_{\text{SOC}} \\ x_{\text{SOC}} &= \frac{2f_{\text{SOC}} - (f_{\text{SOCmax}} + f_{\text{SOCmin}})}{f_{\text{SOCmax}} + f_{\text{SOCmin}}} \\ I_{\text{SOC}} &= \int_0^T x_{\text{SOC}}(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\dot{m}_{f,\text{eq}}$ 为总的瞬时等效燃油消耗; $\dot{m}_{f,\text{eng}}$ 为发动机瞬时燃油消耗; f_{pen} 是一个为了确保电池 SOC 在一定范围内的惩罚函数; I_{SOC} 为电池电流; $\dot{m}_{f,\text{ESS}}$ 为由电池所提供的驱动两个电机的等效燃油消耗率,由下式决定

$$\begin{aligned} \dot{m}_{f,\text{ESS}} &= S_{\text{chg}} \frac{P_{\text{MG1}}}{\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b1}} \eta_{\text{M}}} \frac{1 + \text{sgn}(P_{\text{MG1}})}{2} + \\ &S_{\text{dis}} P_{\text{MG1}}(\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b2}} \eta_{\text{M}}) \frac{1 - \text{sgn}(P_{\text{MG1}})}{2} + \\ &S_{\text{chg}} \frac{P_{\text{MG2}}}{\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b1}} \eta_{\text{M}}} \frac{1 + \text{sgn}(P_{\text{MG2}})}{2} + \\ &S_{\text{dis}} P_{\text{MG2}}(\eta_{\text{pe}} \eta_{\text{b2}} \eta_{\text{M}}) \frac{1 - \text{sgn}(P_{\text{MG2}})}{2} \end{aligned} \quad (20)$$

其中 S_{chg} 和 S_{dis} 分别是电池充电和放电时的等效燃油增益和消耗。

根据 PHEV 运行时电能消耗状态的不同,可以分为 CD 和 CS 两个模式,在 CD 模式下,车辆尽可能以电机驱动车辆以节省燃油消耗,当电机驱动力不足时,发动机才加入与电机共同驱动车辆,直到电池 SOC 下降到最低值时进入 CS 模式,发动机与电机混合驱动车辆,同时维持电池 SOC 在一定值附近波动。PHEV 通过延长电池可参与工作的时间来获得更高的燃油经济性,根据动态规划(DP)的优化结果,电池 SOC 在整个行驶过程中基本呈线性下降的趋势^[6-7],每一时刻的目标 SOC 如下式所示

$$f_{\text{SOCref}}(t) = f_{\text{SOCend}} + \frac{x_t - x}{x_t}(f_{\text{SOCstart}} - f_{\text{SOCend}}) \quad (21)$$

式中: f_{SOCstart} 、 f_{SOCend} 分别为起始 SOC、行程结束时的 SOC; x_t 为总行驶里程; x 为已经行驶的距离; f_{SOCref} 为目标 SOC。参考 SOC 轨迹示意图如图 8 所示。

ECMS 中油电等效因子需要根据动力电池 SOC 和行驶工况来求取,并且 ECMS 策略的控制效

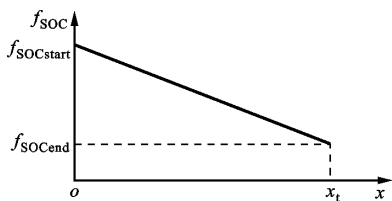


图8 参考SOC轨迹示意图

果与等效因子的选取有极强的相关性,因此将惩罚系数选取为

$$f_{\text{pen}}(t+1) = 0.5(f_{\text{pen}}(t) + f_{\text{pen}}(t-1)) + C_p(f_{\text{SOCref}}(t) - f_{\text{SOC}}(t)) \quad (22)$$

式中 C_p 为比例反馈增益。从上式可以看出,随着实际SOC偏离目标SOC,等效因子也会相应改变,调整发动机与电机之间的功率分配,达到让实际SOC始终跟随目标SOC的控制效果。

3.2 基于多目标补偿因子的GA-ECMS策略

考虑到在不同的初始SOC以及行驶工况循环条件下油电等效因子会略有不同,在自适应ECMS基础上进一步利用遗传算法,针对不同的初始SOC和驾驶里程,以最小油耗和最优目标SOC跟踪效果这两个目标定义适应度函数,对油电等效因子进行修正,以达到瞬时与全局结合的能量最优控制。

遗传算法是Holland提出的一种基于生物进化机制的最优化算法,通过随机搜索进行迭代优化^[27]。针对双电机行星耦合PHEV系统的油电等效因子在不同条件下的最优解问题,对个体的适应度函数定义如下

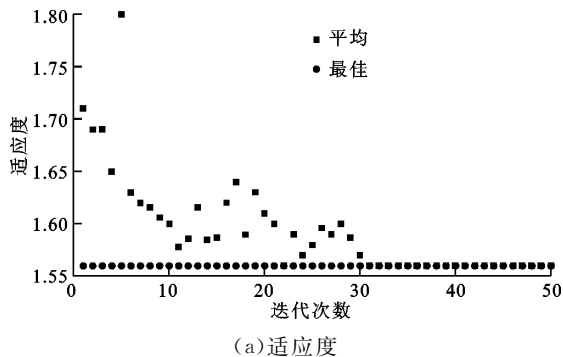
$$f_F = \omega_1 \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{nor}}} + \omega_2 \frac{\left| \int (f_{\text{SOC}}(t) - f_{\text{SOCref}}(t)) dt \right|}{f_{\text{SOCnorref}}} \quad (23)$$

式中: f_F 为个体适应度值; ω 为加权系数,取 $\omega_1 = 0.5$, $\omega_2 = 0.5$; m_{nor} 和 $f_{\text{SOCnorref}}$ 为归一系数。遗传算法的优化目标是在仿真过程中对SOC进行特定规划的情况下使总燃油消耗最小。

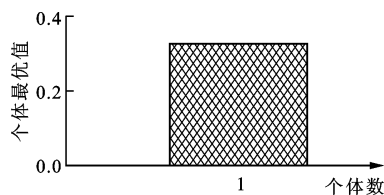
本文利用遗传算法求解基于电池初始SOC和总行驶里程的油电等效因子补偿值Map图,首先根据不同初始SOC及总行驶里程进行多组仿真,选择的工况为NEDC工况,并设置初始SOC为7组,分别是1、0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4,行驶里程分为6组,分别是2、4、6、8、10、12个连续重复的NEDC工况。

在MATLAB下调用遗传算法工具箱编写适应度函数,进行最优等效因子的迭代计算,在初始SOC为0.9、行驶里程为8个NEDC工况下解得的

油电等效因子补偿值为0.324,如图9所示。补偿意为对油电等效因子的动态调整,实际油电等效因子等于补偿值与惩罚系数之和。若当前油电等效因子过小,则补偿值增大,使油电等效因子增大;若当前油电等效因子过大,则补偿值减小,使油电等效因子减小。



(a) 适应度



(b) 最优解

图9 适应度变化曲线及最优解

分别求解了不同初始SOC和行驶里程组合的42种条件下的油电等效因子补偿值,得到油电等效因子补偿值的三维Map图,如图10所示。

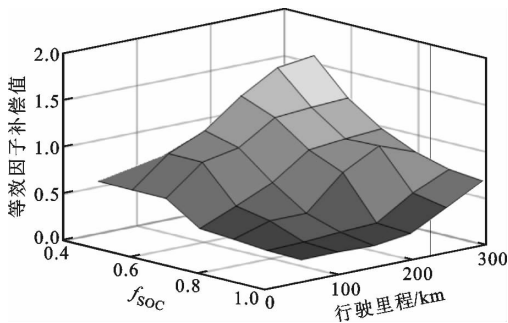


图10 油电等效因子补偿值Map图

从图10可以看出,随着行驶里程的增大,油电等效因子补偿值逐渐变大,使得油电等效因子也逐渐变大,此时能量管理策略趋向于更缓慢地使用电能,反之则趋向于更快速地使用电能,这样可以使混合动力系统在整个行程中更合理、更均匀地使用电能,并提高在不同行驶条件下的燃油经济性,提高系统对不同初始SOC条件和不同驾驶里程的适应性。

将油电等效因子补偿值作为在不同驾驶条件下的油电等效因子的修正值,最终建立GA-ECMS能

量管理策略,如图 11 所示。

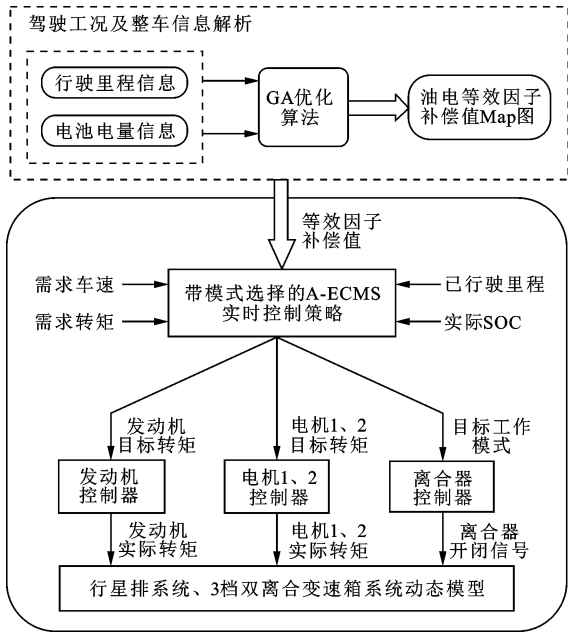


图 11 GA-ECMS 能量管理策略架构

由于研究的新型双电机行星耦合插电式混合动力汽车工作模式比较多,且行星排输出串联一个 3 档双离合变速器,因此比普通的并联式混合动力汽车更为复杂。所提出的 GA-ECMS 策略主要思想是:在其中加入了模式选择以及档位选择算法,不仅可以计算汽车在当前工况下的功率分配,还能比较各个模式之间的燃油经济性,选择最优的模式以及档位,以达到最优控制的目的。

3.3 实例仿真分析

为了验证所建的基于多目标补偿因子的 GA-ECMS 的有效性,以表 2 和表 3 的 PHEV 相关参数为实例进行了仿真计算。

表 2 整车参数			
名称	数值	名称	数值
车辆质量	1 970 kg	驱动形式	4 驱
迎风面积	2.66 m ²	滚动半径	0.353 m
主减速比	3.8	档位速比	2.1/1.12/0.8
满载质量	2 345 kg	旋转质量等效转换系数	1.1
电池容量	70 A·h	额定电压	345 V

驾驶员模型利用 PID 跟踪目标车速的仿真结果表明,其跟踪效果良好,较准确地完成了 NEDC 工况的车速跟踪。图 12 对比了不同策略下的电池 SOC 变化曲线,初始 SOC 为 0.9,结束时刻为 0.4 左右。从图中可以看出,GA-ECMS 策略下的实际

表 3 动力耦合机构参数

名称	数值
齿圈齿数 Z_R	110
齿圈转动惯量 I_R	$1.09 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
行星轮齿数 Z_P	25
行星轮自转转动惯量 I_P	$1.46 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
行星架转动惯量 I_C	$3.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
太阳轮齿数 Z_S	61
太阳轮转动惯量 I_S	$4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

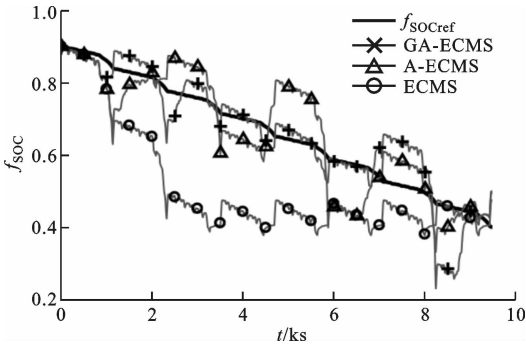


图 12 电池 SOC 变化仿真曲线

SOC 比 A-ECMS 策略的实际 SOC 更加贴近参考 SOC。图 13 记录了车辆在 3 种控制优化策略、8 个 NEDC 工况下的累积燃油消耗量曲线,累积燃油消耗量分别是 2 591、2 492 和 2 263 g。可以看出,GA-ECMS 策略较明显地提高了燃油经济性,在 SOC 保持和油耗方面都最好。

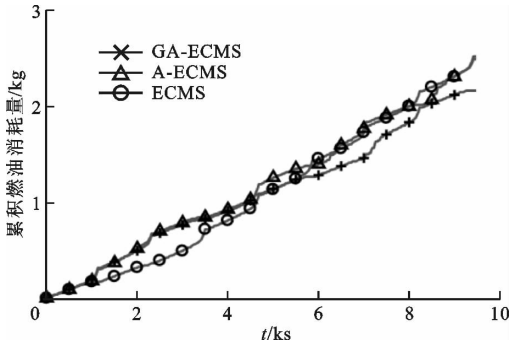


图 13 累积燃油消耗量仿真曲线

4 HiL 测试与性能验证

为了验证控制策略的有效性和运行的实时性,采用硬件在环仿真的试验方法,可以提高对算法验证的准确性并提高开发效率,减少开发成本。试验平台由硬件和软件两部分组成,如图 14 所示。硬件平台主要由 NI 实时仿真机、Bloomy 电池模拟、Chroma 可编程电源和整车快速原型控制器组成。软件平台主

要采用 NI VeriStand 运行环境。VeriStand 是美国 National Instruments 公司专门针对 HiL 仿真测试系统而开发出的软件环境,是一种基于配置的软件环境,它简单易用,无需编程就可完成实时测试系统的创建,实现 HiL 测试中所需的各种功能。

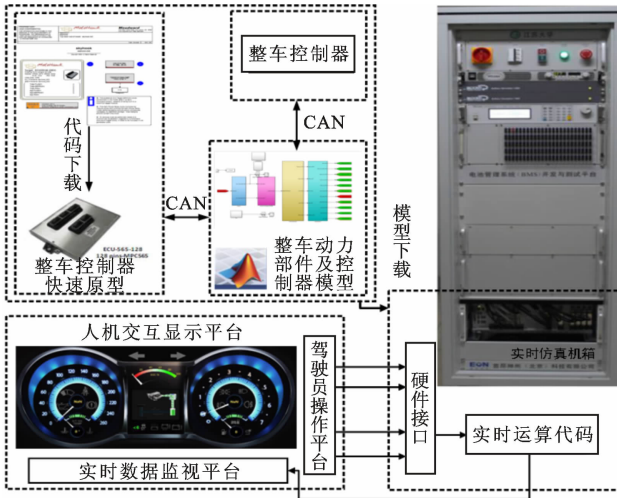


图 14 硬件在环仿真试验系统示意图

在 MATLAB/Simulink 中搭建了行星排式双电机功率分流混合动力系统模型以及控制策略模型,并以 NEDC 工况为例进行仿真测试。下面以初始 SOC 为 0.9、行驶里程为 8 个 NEDC 工况为例,进行仿真试验结果分析。

驾驶员模型利用 PID 跟踪目标车速的试验结果表明,其跟踪效果良好,较准确地完成了 NEDC 工况的车速跟踪。

图 15 对比了车辆在不同策略下的电池 SOC 变化曲线,初始 SOC 为 0.9,结束时刻为 0.4 左右。可以看出:在传统 ECMS 策略下,一开始车辆尽可能以电机驱动车辆来节省燃油消耗,SOC 下降较快,当电机驱动力不足时,发动机与电机共同驱动车辆,直到 SOC 下降到最低值时进入 CS 模式,发动机与电机混合驱动车辆,同时维持 SOC 在一定值附近波动;当控制策略中加入自适应控制时,实际 SOC 始终跟随在参考 SOC 附近,发动机与电机共同驱动车辆,使 SOC 变化曲线尽量贴近使得油耗最小的 SOC 变化曲线;当采取 GA-ECMS 时,优化后的曲线波动幅度进一步减小,更加贴近参考 SOC,这是由于遗传算法可以在 A-ECMS 算法瞬时优化的基础上针对车辆当前的初始 SOC 和行驶里程对油电等效因子做进一步的全局补偿优化,使优化更符合实际驾驶情况。

图 16、17 分别为车辆在 A-ECMS 和 GA-ECMS

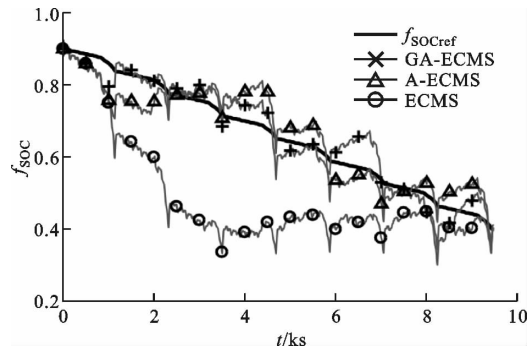


图 15 电池 SOC 变化对比图

下的发动机工作点分布图,可以看出两种策略下的发动机工作点大部分都处于发动机高效区。这是由于行星排的结构优势,可以利用电机 1 控制发动机工作点,通过利用电机 1 的转矩补偿和 PID 控制始终让发动机工作在效率比较高的工作区间。对比之下,A-ECMS 下的发动机工作点中有小部分工作点不在发动机高效区,而 GA-ECMS 下的发动机工作点更为集中在发动机高效区域。这是因为通过 GA 算法得出的 Map 图对油电等效因子补偿优化之后,控制策略会针对当前的驾驶条件状态对三动力源更加合理地分配功率,尽可能避免发动机工作于非高效区。

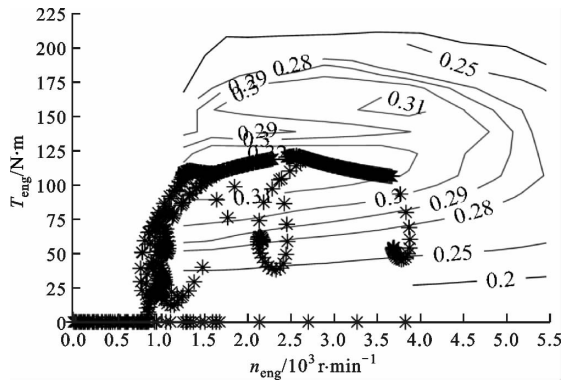


图 16 A-ECMS 下发动机工作点分布

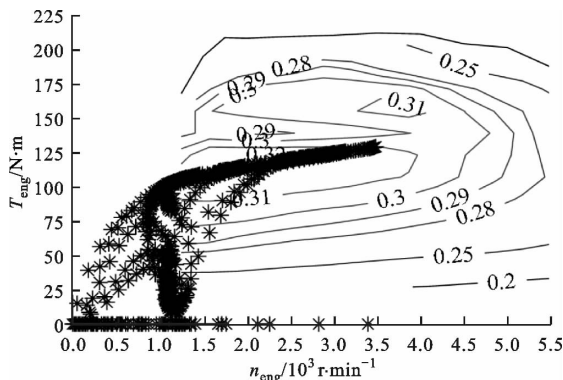


图 17 GA-ECMS 下发动机工作点分布

表 4 列出了在不同策略下的理论仿真与硬件在环试验的百公里油耗,其中这 3 种方法的 HiL 硬件在环试验结果与理论仿真结果的最大误差不超过 7.9%。

表 4 百公里油耗对比验证

管理策略	ECMS	A-ECMS	GA-ECMS
试验等效油耗/L	7.277	7.049	6.808
理论等效油耗/L	6.876	6.803	6.306
相对误差/%	5.83	3.61	7.90

5 结 论

(1)以某新型双电机行星耦合插电式混合动力汽车为研究对象,以车辆燃油经济性为研究目标,结合多动力源之间的耦合机理,建立了油电等效因子自适应瞬态 ECMS 模型;在此基础上进一步引入车辆初始 SOC 和行驶里程对油电等效因子的影响,根据不同驾驶条件对等效因子进行离线遗传优化,建立了基于等效因子优化 Map 图的 ECMS 能量管理策略。

(2)仿真与硬件在环试验验证结果表明,与传统 ECMS 控制策略相比,GA-ECMS 能量管理策略可提高 6.4%的燃油经济性,相比于 A-ECMS 能量管理策略可以提高 3.1%的燃油经济性。在硬件在环试验中,动力部件的工作状态与仿真结果对比基本一致,表明了所制定的控制策略的有效性和可行性。

(3)综上所述,所制定的 GA-ECMS 能量管理策略在实时优化中具有一定的可行性和有效性,能够为下一步混合动力车辆与智能网联道路规划相结合的发展提供更合理有效的整车能量管理方法。

参考文献:

[1] WANG W, SONG R, GUO M, et al. Analysis on compound-split configuration of power-split hybrid electric vehicle [J]. Mechanism & Machine Theory, 2014, 78(8): 272-288.

[2] FINESSO R, SPESSA E, VENDITTI M. Cost-optimized design of a dual-mode diesel parallel hybrid electric vehicle for several driving missions and market scenarios [J]. Applied Energy, 2016, 177: 366-383.

[3] NGO H T, YAN H S. Configuration synthesis of parallel hybrid transmissions [J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 97(5): 51-71.

[4] 左义和, 项昌乐, 闫清东. 混联混合动力汽车动态规划算法研究 [C]//2009 中国汽车工程学会年会论文

集. 北京: 中国汽车工程学会, 2009: 97-101.

[5] 羌嘉曦, 敖国强, 何建辉, 等. 电动汽车动力电池特性仿真系统 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(8): 1196-1200.

QIANG Jiayi, AO Guoqiang, HE Jianhui, et al. Simulation system of electric vehicle battery characteristics [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(8): 1196-1200.

[6] AHMADI S, BATHAEE S M T. Multi-objective genetic optimization of the fuel cell hybrid vehicle supervisory system; fuzzy logic and operating mode control strategies [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(36): 12512-12521.

[7] PROKHOROV D V. Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics [J]. Neural Networks, 2008, 21(2/3): 458-465.

[8] CHENG Y, TRIGUI R, ESPANET C, et al. Specifications and design of a PM electric variable transmission for Toyota Prius; II [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(9): 4106-4114.

[9] ZHANG Q, DENG W, WU J. A rule based energy management system of experimental battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles[J/OL]. Journal of Control Science and Engineering, 2016. [2018-09-15]. DOI: 10.1155/2016/6828269.

[10] PENG J, HE H, XIONG R. Rule based energy management strategy for a series: parallel plug-in hybrid electric bus optimized by dynamic programming [J/OL]. Applied Energy, 2016. [2018-09-15]. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2015.12.031.

[11] FINESSO R, SPESSA E, VENDITTI M. Robust equivalent consumption-based controllers for a dual-mode diesel parallel HEV [J]. Energy Conversion & Management, 2016, 127: 124-139.

[12] SUN C, HE H, SUN F. The role of velocity forecasting in adaptive-ECMS for hybrid electric vehicles [J]. Energy Procedia, 2015, 75: 1907-1912.

[13] HAN J, PARK Y, PARK Y S. A novel updating method of equivalent factor in ECMS for prolonging the lifetime of battery in fuel cell hybrid electric vehicle [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(30): 227-232.

[14] SERRAO L, ONORI S, RIZZONI G. ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control [C]// American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3964-3969.

[15] CHEN Z, MI C C, XIA B, et al. Energy management

- of power-split plug-in hybrid electric vehicles based on simulated annealing and Pontryagin's minimum principle [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 272: 160-168.
- [16] POURABDOLLAH M, MURGOVSKI N, GRAUERS A, et al. An iterative dynamic programming/convex optimization procedure for optimal sizing and energy management of PHEVs [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 6606-6611.
- [17] PIUS P, RIZZONI G. A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(3): 506-518.
- [18] CHEN Z, MI C C, XIONG R, et al. Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 248(7): 416-426.
- [19] 赵福水, 陶栋材, 龙英, 等. 混合动力汽车动力耦合系统结构与发展分析 [J]. *湖南农机*, 2007(9): 12-13.
- ZHAO Fushui, TAO Dongcai, LONG Ying, et al. Structure and development analysis of hybrid power vehicle dynamic coupling system [J]. *Hunan Agricultural Machinery*, 2007(9): 12-13.
- [20] 朱福堂, 陈俐, 殷承良, 等. 混合动力汽车行星齿轮机构的方案设计与优选 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(1): 104-109.
- ZHU Futang, CHEN Li, YIN Chengliang, et al. Conceptual design and optimization of planetary gear mechanism for hybrid electric vehicle [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(1): 104-109.
- [21] 巴特, 高印寒, 王庆年, 等. 基于动态规划算法的并联混合动力客车控制策略优化 [J]. *汽车工程*, 2015, 37(12): 1359-1365.
- BA Te, GAO Yinhan, WANG Qingnian, et al. Optimization of control strategy for parallel hybrid electric bus based on dynamic programming algorithm [J]. *Automobile Engineering*, 2015, 37(12): 1359-1365.
- [22] 邓涛, 罗俊林, 韩海硕, 等. 混合动力汽车工况识别自适应能量管理策略 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(1): 77-83.
- DENG Tao, LUO Junlin, HAN Haishuo, et al. Adaptive energy management strategy based on driving cycle identification for hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(1): 77-83.
- [23] 周楠, 王庆年, 曾小华. 基于工况识别的 HEV 自适应能量管理算法 [J]. *湖南大学学报(自科版)*, 2009, 36(9): 37-41.
- ZHOU Nan, WANG Qingnian, ZENG Xiaohua. Adaptive energy management algorithm for condition recognition of hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2009, 36(9): 37-41.
- [24] 孙家文, 刘胜永, 王建超, 等. 基于转矩分配的混合动力汽车控制策略的优化研究 [J]. *广西科技大学学报*, 2017, 28(1): 29-34.
- SUN Jiawen, LIU Shengyong, WANG Jianchao, et al. Optimization of control strategy for hybrid electric vehicle based on torque distribution [J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2017, 28(1): 29-34.
- [25] 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]. *汽车工程*, 2017, 39(9): 1004-1010.
- QIN Datong, ZENG Yuping, SU Ling, et al. Real time control strategy for plug-in hybrid electric vehicle based on approximate minimum principle [J]. *Automobile Engineering*, 2017, 39(9): 1004-1010.
- [26] 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.
- ZHAO Xiuchun, GUO Ge. Review of energy management strategies for hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Automation*, 2016, 42(3): 321-334.
- [27] 吉根林. 遗传算法研究综述 [J]. *计算机应用与软件*, 2004, 21(2): 69-73.
- JI Genlin. Overview of genetic algorithm research [J]. *Computer Applications and Software*, 2004, 21(2): 69-73.

(编辑 荆树蓉)