

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.031

混合动力汽车自适应等效油耗最低能量管理策略

胡建军, 杨颖, 邹玲菠, 彭桃

(重庆大学汽车工程学院, 重庆 400044)

摘要:为提高插电式混合动力汽车燃油经济性,采用基于动态规划(DP)的控制策略仿真分析了不同典型工况、不同行驶里程下SOC(电池荷电状态)的最优轨迹。在等效油耗最低能量管理策略(ECMS)的基础上,采用比例积分(PI)控制算法实时更新电能-燃油等效因子,以保证SOC实际轨迹能够大致跟随理论参考轨迹,进而提出了一种可实时控制的自适应等效油耗最低能量管理策略(AECMS)。为验证所提控制策略的控制性能有效性,采用不同典型工况及不同行驶里程对ECMS、DP、AECMS的控制性能进行了仿真对比。结果表明,AECMS控制效果接近于DP控制策略且可实时控制,电量消耗(CD)模式下AECMS相对于ECMS减少油耗3.50%~8.71%,电量保持(CS)模式下AECMS相对于ECMS减少油耗1.11%~2.46%。

关键词:插电式混合动力汽车;能量管理策略;自适应等效油耗最低;SOC

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)12-080-15

Adaptive equivalent consumption minimization strategy for plug-in hybrid electric vehicle

HU Jianjun, YANG Ying, ZOU Lingbo, PENG Tao

(School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to improve the fuel economy of plug-in hybrid vehicles (PHEV), the optimal trajectories of state of charge (SOC) under different typical driving cycles and different driving distances were simulated and analyzed by using dynamic programming (DP) algorithm. On the basis of equivalent fuel consumption minimum strategy (ECMS), PI control was used to update the energy fuel equivalent factor in real time, so as to ensure that the actual SOC trajectory could roughly follow the theoretical reference trajectory, and then an adaptive equivalent consumption minimization strategy (AECMS) which can be controlled in real time was proposed. To verify the effectiveness of the proposed control strategy, different typical working conditions and driving mileages were used to simulate and compare the control performances of ECMS, DP and AECMS. The results show that the control effect of AECMS was close to

收稿日期:2020-04-20 **网络出版日期:**2020-11-04

基金项目:重庆市技术创新与应用示范重大主题专项项目(CSTC2018JSZX-CYZTZ0047);国家重点研发计划项目(2018YFB0106100)。

Supported by the Chongqing Artificial Intelligence Technology Innovation Major Special Project (CSTC2018JSZX-CYZTZ0047) and the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0106100).

作者简介:胡建军(1973—),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事车辆动力传动与控制的研究,(E-mail)hujianjun@cqu.edu.cn。

that of DP and could be controlled in real time. AECMS reduced fuel consumption by 3.50%~8.71% in CD mode and 1.11%~2.46% in CS mode compared with ECMS.

Keywords: PHEV; energy management strategy; adaptive equivalent consumption minimization; SOC

近年来,随着世界上汽车总量不断攀升,能源与环境成为了不可忽视的问题^[1]。插电式混合动力汽车以电能和燃油作为能量源,能够有效提升汽车燃油经济性,同时降低尾气排放,非常具有研究意义^[2]。能量管理策略是插电式混合动力汽车的核心技术之一,决定了动力源之间的动力分配关系,对插电式混合动力汽车的动力性、燃油经济性、排放等都有重大影响。在目前的研究中,插电式混合动力汽车能量管理策略主要被分成两大类^[3-4]:基于规则的控制策略和基于优化的控制策略。

基于规则的控制策略又分为基于确定规则与基于模糊规则的控制策略。基于确定规则的控制策略^[5-7]通过设立车速、电池荷电状态(SOC,公式和图表中用 S_{bat} 表示)、需求转矩、功率等逻辑门限值,控制汽车进入不同的工作模式,从而提升汽车的燃油经济性。这类方法简单直观,实用性强,但对工况的变化非常敏感,确定的逻辑门限值不能良好地适应各种不同工况。为此,有学者提出基于模糊规则的控制策略^[8-11]。程飞等^[11]采用基于模糊规则的控制策略,通过对 SOC、 ΔSOC 、 K 值(需求转矩与当前转速下发动机最大转矩的比值)模糊化,制定相应的模糊规则,控制电机和发动机高效工作。基于模糊规则相比于基于确定规则的控制策略在一定程度上减少了对工况的依赖性,可实现非线性控制,鲁棒性好。但它也是依靠专家经验人为地根据发动机和电机工作特性进行经验性控制与调节,插电式混合动力汽车的燃油经济性仍有提升空间。

基于优化的控制策略包括基于全局优化的控制策略与基于瞬时优化的控制策略。基于全局优化的控制策略^[12-15]主要包括基于动态规划(dynamic programming, DP)的控制策略、基于庞特里亚金最值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)的控制策略。段骏华等^[12]采用改进型 DP 控制策略,仿真结果表明采用该改进型 DP 控制策略可有效降低油耗。Kim 等^[15]用庞特里亚金最值原理获得全局最优解,其燃油经济性与 DP 十分接近。基于全局优化的控制策略可使汽车达到最佳燃油经济性,但需预先知道未来行驶工况,同时数值计算量巨大,无法适用于插电式混合动力汽车的实时控制。基于瞬时优化的控制策略^[16-22]主要包括基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的控制策略和基于等效油耗最低的控制策略(equivalent consumption minimization strategy, ECMS)。Zhao 等^[16]使用基于模型预测的控制策略,将整个驾驶循环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,以油耗最小化为目标进行滚动优化。Paganelli 等^[18]较早提出了 ECMS,科学地将电量消耗等效为燃油消耗,实时选择综合油耗最低的工作点。欧阳等^[20]采用 ECMS 通过 BP 神经网络识别行驶路况,优化不同行驶路况的能量流动控制。Zhang 等^[21]采用改进的 ECMS 结合模糊 PI 算法调整等效因子,保证电池电量较为恒定,使得混合动力汽车的燃油经济性进一步提高。

ECMS 无需专家经验,控制效果优于基于规则的管理策略;无需预知未来工况,工况适应性好;计算量远小于基于全局优化的控制策略,可实现实时控制和瞬时等效油耗最低,拥有着良好的应用前景。该类方法通过等效因子将电能消耗等效为燃油消耗,因此制定等效因子是其核心,也是影响燃油经济性表现的关键因素。普通混合动力汽车只能通过发动机消耗燃油补充电能,故而电能消耗可合理等效为燃油消耗,文献[18]中制定等效因子的方法被广泛采用。但插电式混合动力汽车可通过电网给电池充电,目前其油电等效因子并没有统一的制定方法。

笔者通过动态规划算法,分析了不同典型工况、不同行驶距离下的最优 SOC 下降轨迹,并得到了最优 SOC 轨迹和行驶距离的一般规律;结合最优 SOC 轨迹和行驶距离的一般规律,建立了单次充电行驶里程的概念并制定了一种新型的等效因子制定方法,进而在传统 ECMS 的基础上,提出了一种可实时控制的自适应等效油耗最低能量管理策略(adaptive equivalent consumption minimization strategy, AECMS)。

1 并联插电式混合动力汽车建模

基于 Matlab 建模仿真平台,对某并联插电式混合动力汽车(PHEV)展开研究。其整车构型如图 1 所

示,图中 C1 为离合器, MG 为 ISG 电机, AT 为 4 挡自动变速器。

整车参数如表 1 所示,发动机、电机、电池等部件数值模型数据均为台架测试数据。该插电式混合动力汽车共有 5 种工作模式,分别为纯电动模式(P_{+EV})、发动机单独驱动模式(P_{engine})、混合驱动模式($P_{engine+MG}$)、行车充电模式($P_{engine-MG}$)、制动回收模式(P_{-EV})。各工作模式下各部件的工作状态如表 2 所示。

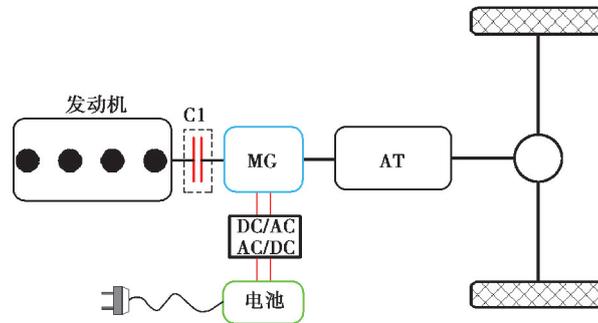


图 1 某并联插电式混合动力汽车构型

Fig. 1 Configuration of a parallel PHEV

表 1 汽车参数

Table 1 Vehicle parameters

参数	数值
汽车质量/kg	1 700
汽车迎风面积/m ²	1.746
空气阻力系数	0.3
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.2
车轮半径/m	0.38
滚动阻力系数	0.015
主减速器速比	4.0
旋转质量换算系数	1.055
传动总效率	0.9
发动机转速范围/(r·min ⁻¹)	800~5 600
发动机最大扭矩/(N·m)	137
MG 最大转速/(r·min ⁻¹)	10 000
MG 最大扭矩/(N·m)	200
电池容量/Ah	40
电池额定电压/V	340
变速器速比	[4.00 2.38 1.45 0.90]

表 2 各工作模式下各部件的工作状态

Table 2 Working status of each component under each working mode

工作模式	Engine 状态	MG 状态	C1 状态
P_{+EV}	○	●	○
P_{engine}	●	○	●
$P_{engine+MG}$	●	●	●
$P_{engine-MG}$	●	●	●
P_{-EV}	○	●	○

注:●代表离合器结合或者(发动机与电机)工作;○代表离合器分离或者(发动机与电机)关闭。

1.1 发动机

通过数值建模得到发动机燃油消耗率的数值模型如图 2 所示。通过发动机的工作转速和转矩可插值得到发动机的燃油消耗率。

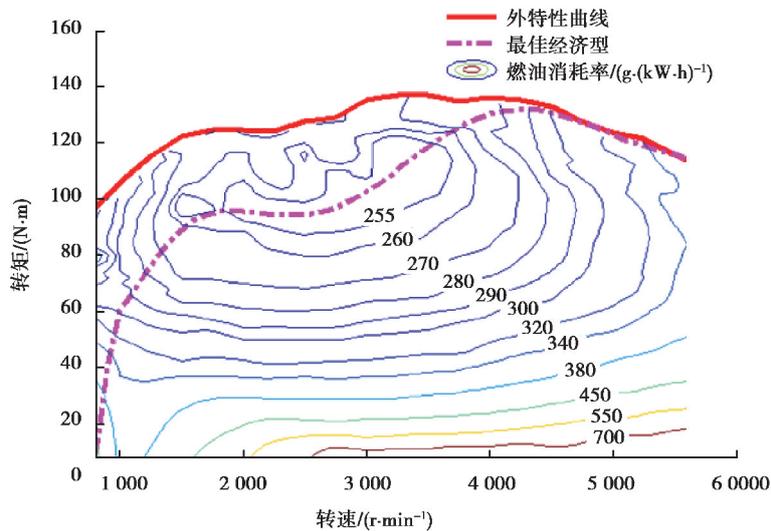


图 2 发动机燃油消耗率 map 图

Fig. 2 Engine fuel consumption rate map

1.2 电机

电机模型也通过数值模型建立,电机效率的数值模型如图 3 所示。

电机在转矩为正时处于驱动状态,转矩为负时处于发电状态。驱动状态下的电机功率由式(1)计算,发电状态下由式(2)计算:

$$P_{m_dis} = n_m T_m / \eta_{m_dis}, \tag{1}$$

$$P_{m_chg} = n_m T_m \eta_{m_chg} \tag{2}$$

式中: n_m 和 T_m 分别代表电机的转速和转矩; P_{m_dis} 和 η_{m_dis} 分别代表电机驱动状态下的功率和效率; P_{m_chg} 和 η_{m_chg} 分别代表电机发电状态下的功率和效率。

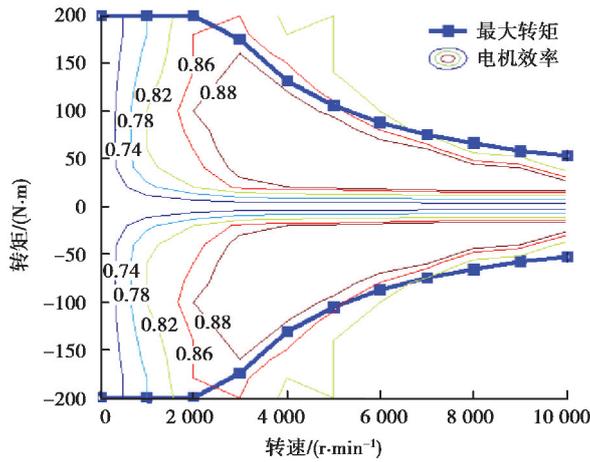


图 3 电机效率 map 图

Fig. 3 Motor efficiency map

1.3 电池

选用电池内阻模型^[22], 电池功率由式(3)计算:

$$P_{\text{bat}} = V_{\text{oc}} I_{\text{bat}} - I_{\text{bat}}^2 R_{\text{bat}} \quad (3)$$

式中: P_{bat} 为电池功率; V_{oc} 为电池开路电压; I_{bat} 为电池电流; R_{bat} 为电池内阻。 V_{oc} 和 R_{bat} 均与电池电量状态 (SOC) 有关, 其数值模型如图 4 中 (a) (b) 所示。

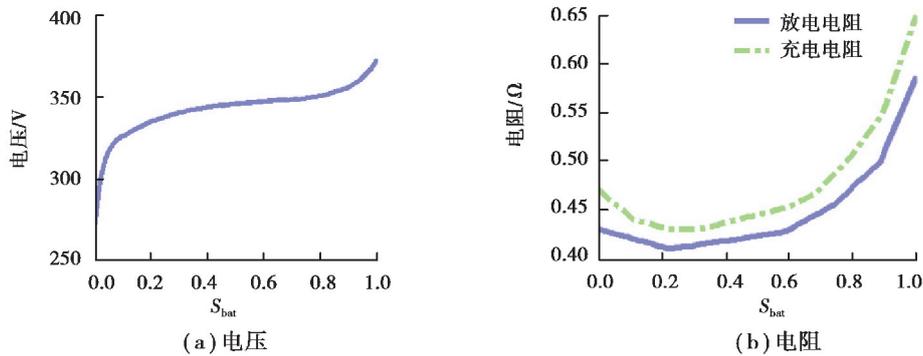


图 4 电池模型

Fig. 4 Battery model

对式(3)求解得到电池电流:

$$I_{\text{bat}} = \frac{V_{\text{oc}} - \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4R_{\text{bat}} P_{\text{bat}}}}{2R_{\text{bat}}} \quad (4)$$

电池 SOC 由式(5)计算得到:

$$S_{\text{bat}_t} = S_{\text{bat}_0} - \frac{1}{C} \int_0^t I_{\text{bat}} dt \quad (5)$$

式中: S_{bat_t} 为电池经过时间 t 后的 SOC; S_{bat_0} 为电池起始 SOC; C 为电池容量; t 为电池充放电的时间。

2 控制策略设计

插电式混合动力汽车的能量由电能和燃油共同提供, 各能量源之间的关系如图 5 所示。

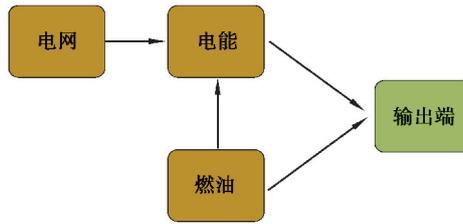


图 5 混合动力系统能量流动图

Fig. 5 Energy flow diagram of hybrid power system

插电式混合动力汽车的各能量源的关系如式(6)所示:

$$E_{ele} + E_{fuel} = E_{req} \quad (6)$$

式中: E_{ele} 为电能, E_{fuel} 为燃油能量, E_{req} 为需求能量。

由式(6)可知,插电式混合动力汽车的需求能量由电能和燃油能量组成。在各个时刻,当需求能量 E_{req} 确定时,可以分配不同的 E_{ele} 和 E_{fuel} 以达到驾驶员的动力需求。当 E_{ele} 为正时电机消耗电池电能,当 E_{ele} 为负时通过发动机发电或者制动回收补充电池电能。基于全局优化的控制策略可以在各约束条件下,获得各时刻方程的最优解序列,通过最优分配电能和燃油能量,使各时刻燃油消耗量之和最小,是理论上的最优控制策略。SOC 轨迹是电池电能消耗的表现形式,从 SOC 轨迹可以得到各时刻电能的使用情况,继而可得到各个时刻电能和燃油能量的分配方式。

如图 6(a)所示,当采用最优控制策略时,可通过最优分配电能和燃油能量,使汽车达到最低燃油消耗,此 SOC 下降轨迹便是最优 SOC 下降轨迹。从另一个角度来说,如图 6(b)所示,如果已知某段行程中最优 SOC 下降轨迹,就可以实时分配电能和燃油能量,使实际 SOC 沿最优 SOC 下降轨迹变化。此时电能和燃油能量的分配方式等同于最优控制策略,汽车可达到最低燃油消耗。可以得到如下推论:如果提前规划出某段行程的最优 SOC 下降轨迹,就可使汽车在这段行程中达到最低燃油消耗。

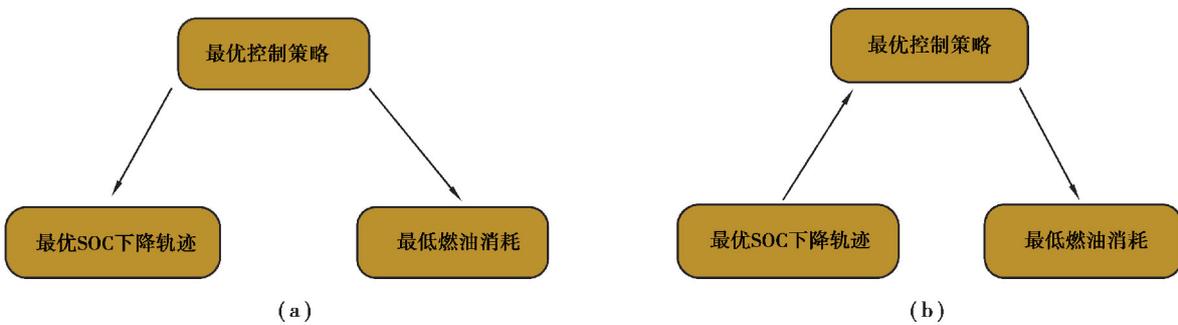


图 6 能量管理策略逻辑推理图

Fig. 6 Logic reasoning diagram of energy management strategy

2.1 DP 控制策略

动态规划算法(DP)的原理是把一个连续的过程离散化,从全局的角度得出一个最优解。DP 控制策略是一种基于全局优化的控制策略,通过 DP 控制策略可以使汽车在某段行程中燃油消耗最低。笔者基于 DP 控制策略仿真分析不同行驶距离、不同工况条件下的最优 SOC 下降轨迹,在此基础上探讨 SOC 的变化规律。

2.1.1 模型搭建及求解

将电池的荷电状态 SOC 定义为状态变量,将发动机的转矩 T_e 、自动变速器挡位 i_g 、工作模式 m 定义为控制变量。当系统状态从 k 阶段转移到 $k+1$ 阶段时,则系统的状态转移方程为:

$$S_{bat}(k+1) = S_{bat}(k) - \Delta S_{bat}(k) \quad (7)$$

将发动机转矩 T_e 离散化,在状态转移的过程中,当各控制变量取不同值时,将产生不同的燃油消耗及电量消耗,这就是递推过程中每一步产生的成本。将每一步的成本叠加就得到了整个系统的成本函数。成本函数由式(8)描述:

$$\begin{cases} F_1(k) = F_1[S_{\text{bat}}(k), T_e(k), i_g(k), m(k)] = \Delta f_{\text{fuel}}(k) + f_{\text{SOC}}(k); \\ J_{1_min} = \min \sum_{k=1}^N F_1(k)。 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta f_{\text{fuel}}(k)$ 为第 k 阶段燃油消耗; $f_{\text{SOC}}(k)$ 为第 k 阶段惩罚项; $F_1(k)$ 为第 k 阶段的成本; N 为总的阶段数; J_{1_min} 为整个过程的最小成本。

惩罚函数由式(9)描述:

$$\begin{cases} f_{\text{SOC}}(k) = 0, & S_{\text{bat}}(k) \geq S_{\text{bat_low}}; \\ f_{\text{SOC}}(k) = 100, & S_{\text{bat}}(k) < S_{\text{bat_low}}。 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $S_{\text{bat_low}}$ 为电池理想工作区荷电状态下限值。

在求解过程中,将每个阶段的状态变量和控制变量离散化后,并把整个测试工况按单位时间(1 s)进行离散,采用插值的方式逐步求解^[12]。各控制变量与状态变量离散化程度如表 3 所示。

表 3 各变量离散化程度

Table 3 Discretization degree of each variable

电池荷电状态 S_{bat}	发动机转矩 $T_e/(N \cdot m)$	变速器速比 i_g
0: 0.001: 1	0: 1: 137	[4.00 2.38 1.45 0.90]

2.1.2 DP 控制策略结果分析

为探究行驶距离、工况等重要因素对燃油经济性的影响,采用 4 种不同行驶距离以及 8 种典型工况进行离线仿真,包括代表城市工况的 UNIF01、WVUSUB、SC03,代表高速工况的 WVUINTER、REP05 和代表综合工况的 NEDC、WLTP、LA92。为减少对电池的伤害,设定 SOC 初始值为 0.9, SOC 下限值为 0.3^[23]。不同循环工况、不同行驶距离下最优 SOC 下降轨迹如图 7 所示,所有 SOC 最终都下降到 0.3 附近,说明 DP 控制策略充分利用了电池电能,并通过惩罚函数限制电池电量不下降到过低的水平。可以观察到即使工况不同、行驶距离不同,最优 SOC 都大致随行驶距离沿直线下降。

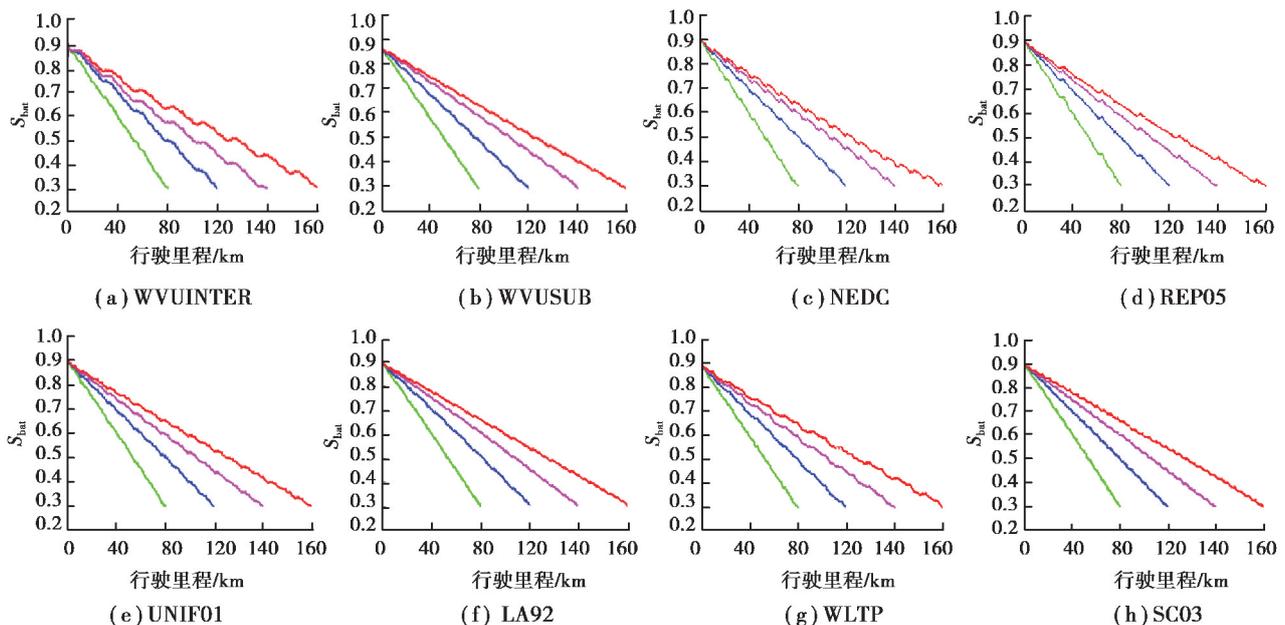


图 7 不同典型工况、不同行驶距离下 SOC 变化曲线

Fig. 7 SOC change curve under different typical working conditions and different driving distances

2.2 自适应等效油耗最低能量管理策略

如前文所述,传统 ECMS 具备良好的应用前景。ECMS 最初被提出是为了改善普通混合动力汽车燃油经济性,由于普通混合动力汽车电池电能几乎全部来源于燃油,所以可计算出合理的等效因子将电能消耗等效为燃油消耗。插电式混合动力汽车的电池电能来源为燃油及电网,目前其等效因子没有统一的制定方法。为保证充分利用电池电能,ECMS 对于插电式混合动力汽车时的控制方法如下:当电量充足时,汽车仅以纯电动模式运行,电池处于电量消耗(CD)阶段;当 SOC 下降到其限制值时,汽车可使用所有工作模式,电池处于电量保持(CS)阶段。ECMS 可使汽车在 CD 阶段瞬时电量消耗最低,在 CS 阶段瞬时等效燃油消耗最低。这种方式的控制下,SOC 先迅速下降,后保持在其限制值附近。该控制策略下的 SOC 轨迹与 DP 控制策略下的最优 SOC 下降轨迹存在较大差异,且油耗明显高于 DP 控制策略。故笔者在 ECMS 的基础上,提出了一种改进的控制策略——自适应等效油耗最低能量管理策略(AECMS)。

2.2.1 模型搭建

从前文推论可以看出,提前规划出某段行程中的最优 SOC 下降轨迹,可使汽车燃油消耗最低。而汽车实际工作过程中,路况复杂且受外界因素影响而随时改变,所以不可能提前规划出最优 SOC 下降轨迹。DP 控制策略的仿真结果显示,最优 SOC 轨迹都大致随里程沿直线下降,最终下降到电池理想工作区荷电状态范围下限值。根据 DP 控制策略仿真结果,可以用一条直线作为 SOC 理论参考轨迹(图 8),代替最优 SOC 下降轨迹。

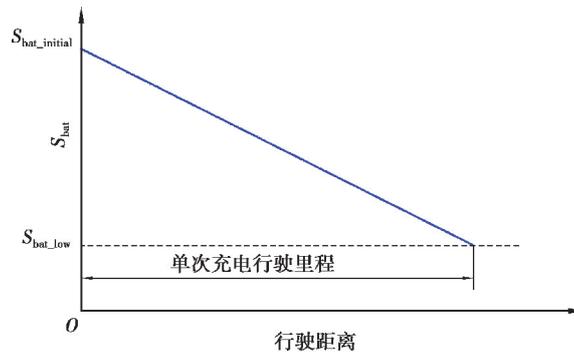


图 8 SOC 理论参考轨迹

Fig. 8 SOC theoretical reference trajectory

图 8 中:纵轴为 SOC,横轴为行驶距离, $S_{bat_initial}$ 为初始 SOC, L 为单次充电行驶里程。以纯电动续航里程标称为 60 km 的某插电式混合动力汽车为例,若用户习惯于每行驶 200 km 充电一次,则该车的单次充电行驶里程为 200 km,故单次充电行驶里程不同于纯电动续航里程。用户可根据自己的用车习惯以及充电条件,自行设定单次充电行驶里程。

通过 SOC 理论轨迹,整段行程中行驶距离 X 处的 SOC 理论参考值 S_{bat_ref} 可由方程(10)得到:

$$S_{bat_ref} = S_{bat_initial} - (S_{bat_initial} - S_{bat_low}) \frac{X}{L} \quad (10)$$

AECMS 定义在某一瞬时工况下将电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阶段的综合油耗成本函数。AECMS 的成本函数可由式(11)描述:

$$\begin{cases} F_2(k) = F_2 [T_e(k), i_g(k), m(k)] = \Delta f_{fuel}(k) + \lambda \Delta S_{bat}(k); \\ J_{2_min} = \sum_{k=1}^N \min F_2(k). \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta f_{fuel}(k)$ 为第 k 阶段燃油消耗; λ 为等效因子; $\Delta S_{bat}(k)$ 为第 k 阶段的电池 SOC 变化量; $F_2(k)$ 为第 k 阶段的成本; J_{2_min} 为各阶段最低成本之和。

利用 PI 算法实时调整更新等效因子 λ ,使 SOC 实际轨迹能够大致跟随理论参考轨迹。 λ 由式(12)(13)描述:

$$e_t = S_{\text{bat_ref}} - S_{\text{bat}_X}, \quad (12)$$

$$\lambda = K_p e_t + K_i \int_0^t e_t dt. \quad (13)$$

式中: S_{bat_X} 为行驶 X 距离后 SOC 的实际值, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数。

2.2.2 约束条件

SOC、发动机转矩 T_e 、发动机转速 ω_e 、电机转矩 T_m 、电机转速 ω_m 、电池输出功率 $P_{\text{bat_dis}}$ 、电池充电功率 $P_{\text{bat_chg}}$ 需要同时服从式(14)的约束:

$$\begin{cases} S_{\text{bat_min}} \leq S_{\text{bat}}(k) \leq S_{\text{bat_max}}; \\ \omega_{e_min} \leq \omega_e(k) \leq \omega_{e_max}; \\ T_{e_min}(\omega_e(k)) \leq T_e(k) \leq T_{e_max}(\omega_e(k)); \\ \omega_{m_min} \leq \omega_m(k) \leq \omega_{m_max}; \\ T_{m_min}(\omega_m(k)) \leq T_m(k) \leq T_{m_max}(\omega_e(k)); \\ P_{\text{bat_dis}}(k) \leq P_{\text{bat_dis_max}}(S_{\text{bat}}(k)); \\ P_{\text{bat_chg}}(k) \leq P_{\text{bat_chg_max}}(S_{\text{bat}}(k)). \end{cases} \quad (14)$$

式中: $S_{\text{bat_min}}$ 为 SOC 最小值 0; $S_{\text{bat_max}}$ 为 SOC 最大值 1; ω_{e_min} 和 ω_{e_max} 为发动机最低和最高转速; T_{e_min} 和 T_{e_max} 为发动机在转速为 $\omega_e(k)$ 时的最小和最大转矩; ω_{m_min} 和 ω_{m_max} 为电机最低和最高转速; T_{m_min} 和 T_{m_max} 为电机在转速为 $\omega_m(k)$ 时的最小和最大转矩; $P_{\text{bat_chg_max}}$ 和 $P_{\text{bat_dis_max}}$ 为电池最大充电和放电功率。

2.2.3 求解过程

AECMS 是一种基于瞬时优化的控制策略, 通过求解单位时间(1 s)的最低综合油耗, 可实现实时控制。AECMS 的求解如图 9 所示。

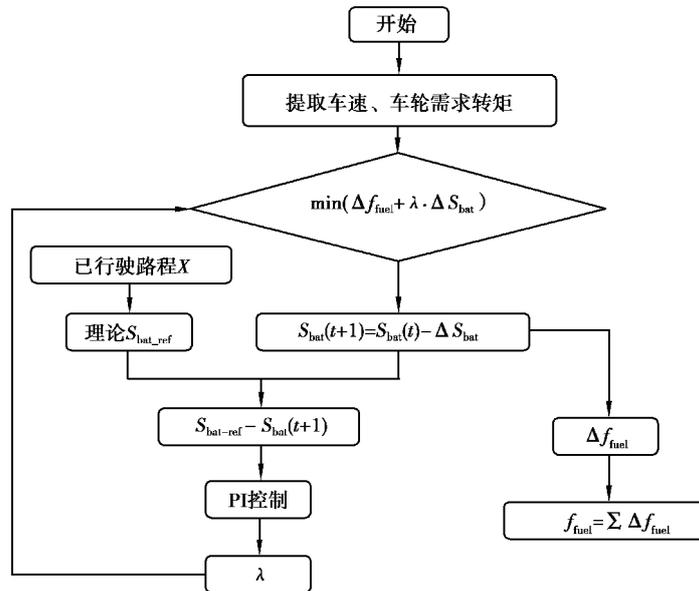


图 9 AECMS 求解过程

Fig. 9 AECMS solution process

3 结果分析

为充分对比 ECMS、DP、AECMS 3 种控制策略下汽车的燃油消耗、SOC 曲线轨迹、发动机与电机工作点分布, 以不同单次充电行驶里程及不同典型工况作为仿真条件。所采用的典型工况如图 10 所示, 包括代表综合工况的 NEDC、WLTP, 代表城市工况的 UDSS 以及代表高速工况的 HWFET。

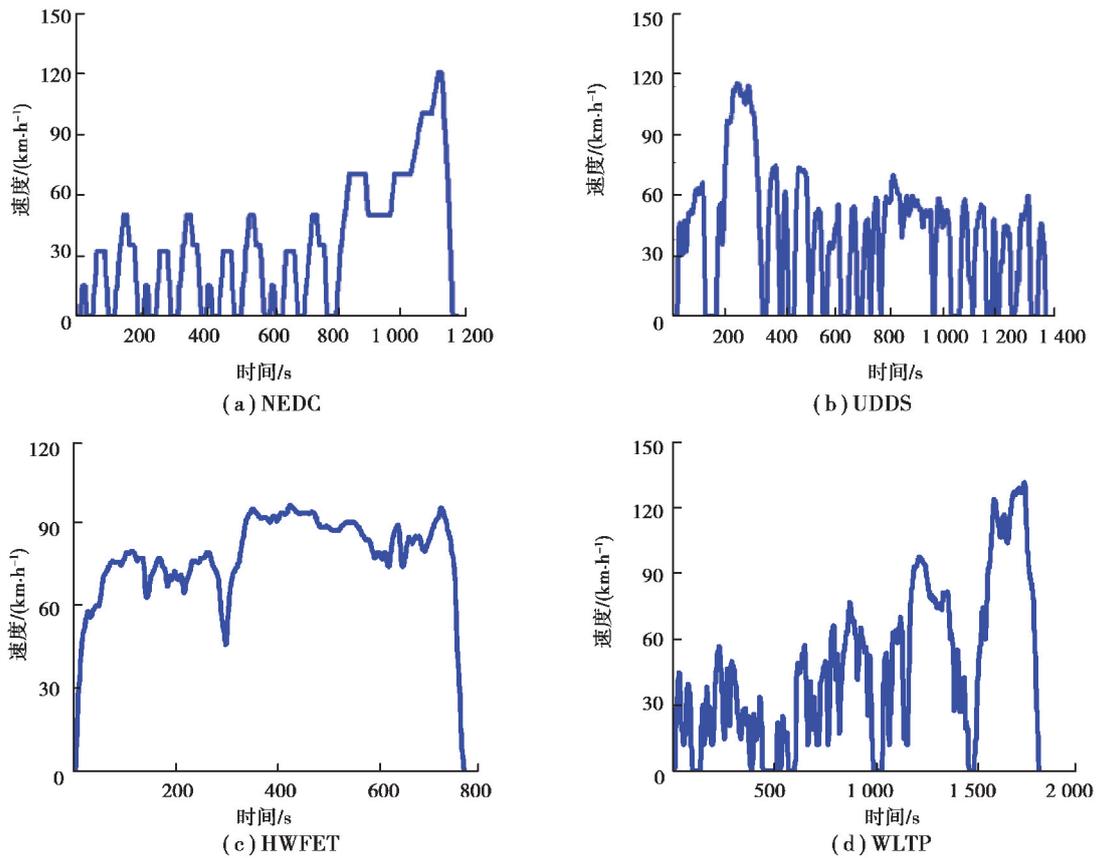


图 10 各典型工况

Fig. 10 Typical working conditions

3.1 CD 模式仿真结果及分析

表 4~7 为初始 SOC 为 0.9 时 3 种控制策略的燃油消耗结果对比。在不同工况、不同单次充电行驶里程的情况下, AECMS 相对于传统 ECMS 能节省燃油 3.50%~8.71%, 相对于 DP 控制策略多消耗燃油 2.27%~6.70%。图 11 为 NEDC 工况、160 km 单次充电行驶距离条件下的仿真结果, 其中(a)为 SOC 随行驶距离变化曲线; (b)(c)(d)为 3 种控制策略下的发动机工作点; (e)(f)(g)为 3 种控制策略下的电机工作点。AECMS 可适应各种工况及单次充电行驶里程, 通过控制 SOC 实际轨迹随行驶距离沿直线下降, 其对电能与燃油能量的分配方式与 DP 控制策略相似, 从而有效降低燃油消耗。

表 4 NEDC 工况下 3 种控制策略燃油消耗结果

Table 4 Fuel consumption results of three control strategies under NEDC

单次充电 行驶里程/km	终点 SOC			油耗/(L·(100 km) ⁻¹)		
	ECMS	DP	AECMS	ECMS	DP	AECMS
80	0.300 6	0.301 0	0.299 2	2.128	1.849	1.944
120	0.299 7	0.300 3	0.300 0	3.269	2.938	3.106
160	0.299 8	0.300 4	0.299 5	3.773	3.451	3.604
200	0.300 0	0.301 9	0.294 5	4.104	3.791	3.959

表 5 UDDS 工况下 3 种控制策略燃油消耗结果

Table 5 Fuel consumption results of three control strategies under UDDS

单次充电 行驶里程/km	终点 SOC			油耗/(L·(100 km) ⁻¹)		
	ECMS	DP	AECMS	ECMS	DP	AECMS
80	0.299 7	0.300 4	0.300 2	1.976	1.732	1.848
120	0.300 0	0.300 5	0.299 3	3.040	2.744	2.886
160	0.300 9	0.301 5	0.300 3	3.591	3.297	3.444
200	0.299 9	0.300 4	0.299 7	3.915	3.625	3.778

表 6 HWFET 工况下 3 种控制策略燃油消耗结果

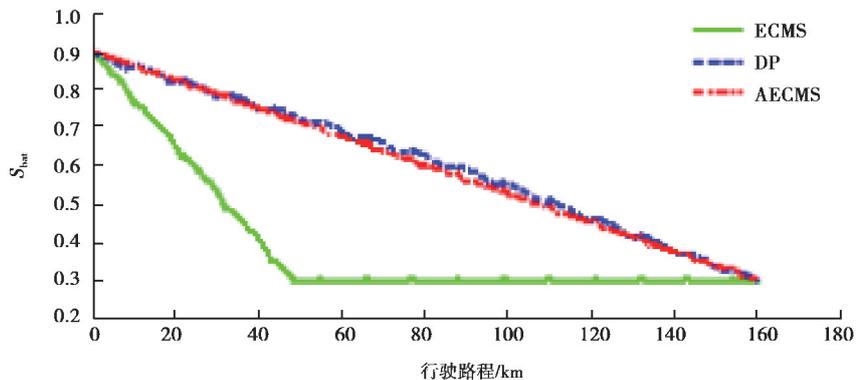
Table 6 Fuel consumption results of three control strategies under HWFET

单次充电 行驶里程/km	终点 SOC			油耗/(L·(100 km) ⁻¹)		
	ECMS	DP	AECMS	ECMS	DP	AECMS
80	0.299 9	0.300 5	0.301 0	1.941	1.771	1.820
120	0.299 9	0.300 4	0.299 2	3.032	2.762	2.869
160	0.299 3	0.300 5	0.299 8	3.602	3.338	3.432
200	0.299 5	0.300 4	0.299 4	3.920	3.661	3.744

表 7 WLTP 工况下 3 种控制策略能量消耗结果

Table 7 Fuel consumption results of three control strategies under WLTP

单次充电 行驶里程/km	终点 SOC			油耗/(L·(100 km) ⁻¹)		
	ECMS	DP	AECMS	ECMS	DP	AECMS
80	0.299 7	0.300 4	0.298 3	2.731	2.386	2.493
120	0.299 8	0.300 5	0.299 9	3.740	3.367	3.540
160	0.297 5	0.300 2	0.300 1	4.310	3.952	4.105
200	0.299 9	0.300 0	0.299 1	4.556	4.208	4.348



(a) 3种控制策略下的SOC轨迹

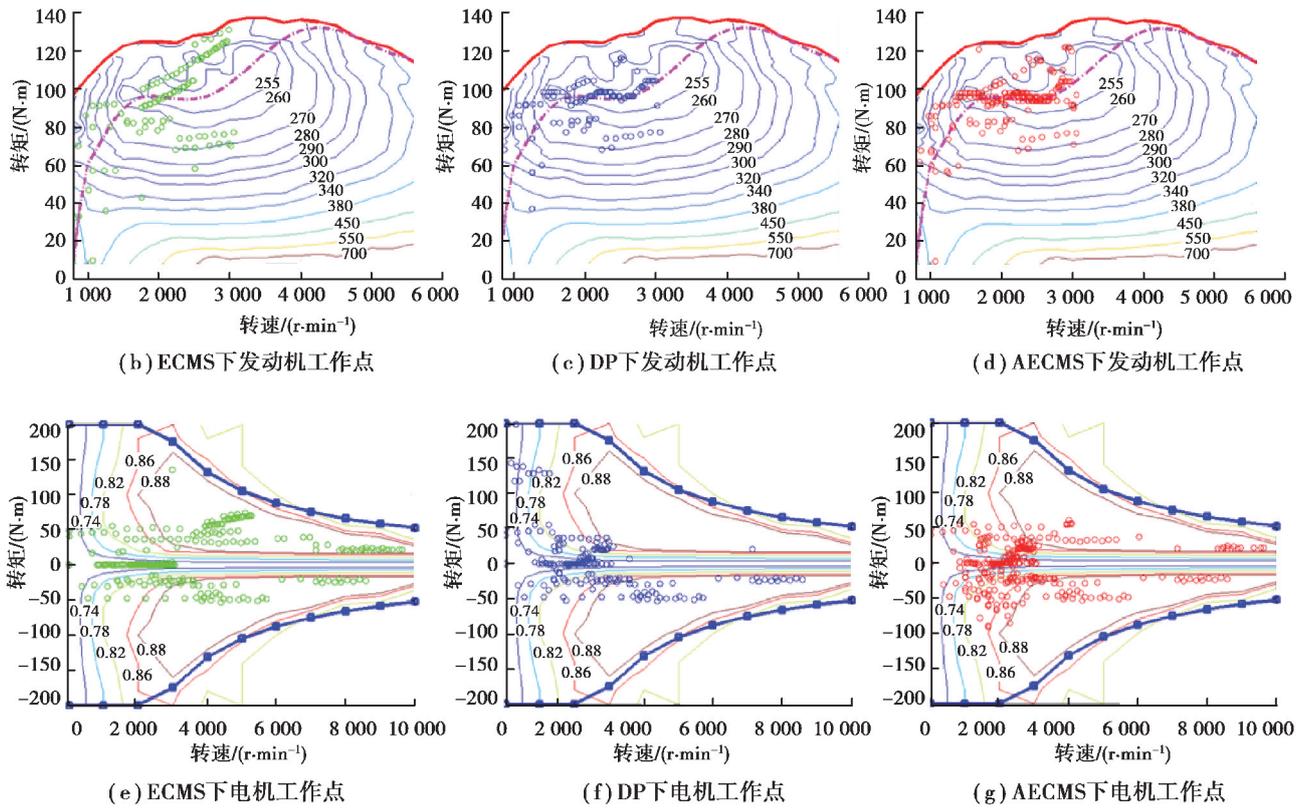


图 11 CD 模式下 3 种控制策略的仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of simulation results of three control strategies in CD mode

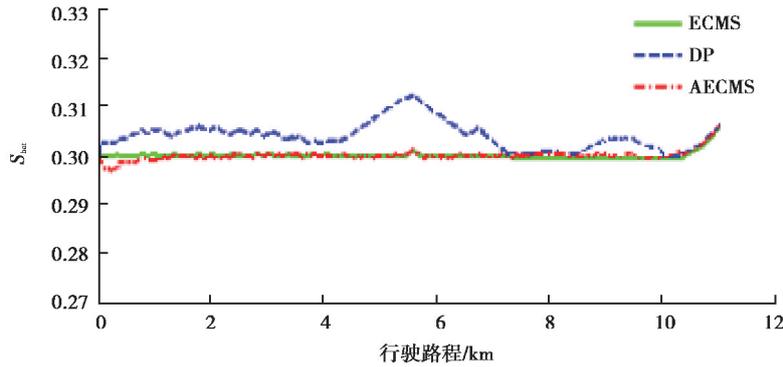
3.2 CS 模式仿真结果及分析

结合实际情况,部分用户因充电条件受限而极少通过电网为汽车充电,因此插电式混合动力汽车在电量维持(CS)模式下的油耗表现同样十分重要。表 8 为初始 SOC 为 0.3 时 3 种控制策略的燃油消耗结果对比。在不同工况、不同单次充电行驶里程的情况下,AECMS 相对于传统 ECMS 能节省燃油 1.11%~2.46%,相对于 DP 控制策略多消耗燃油 0.78%~2.65%。图 12 为 NEDC 工况下的仿真结果,其中(a)为 SOC 随行驶距离变化曲线;(b)(c)(d)为 3 种控制策略下的发动机工作点;(e)(f)(g)为 3 种控制策略下的电机工作点。AECMS 控制下 SOC 始终维持在 0.3 附近,发动机工作点主要分布在最佳燃油经济线附近。AECMS 可实时改变等效因子,使发动机更好地工作于高效区。

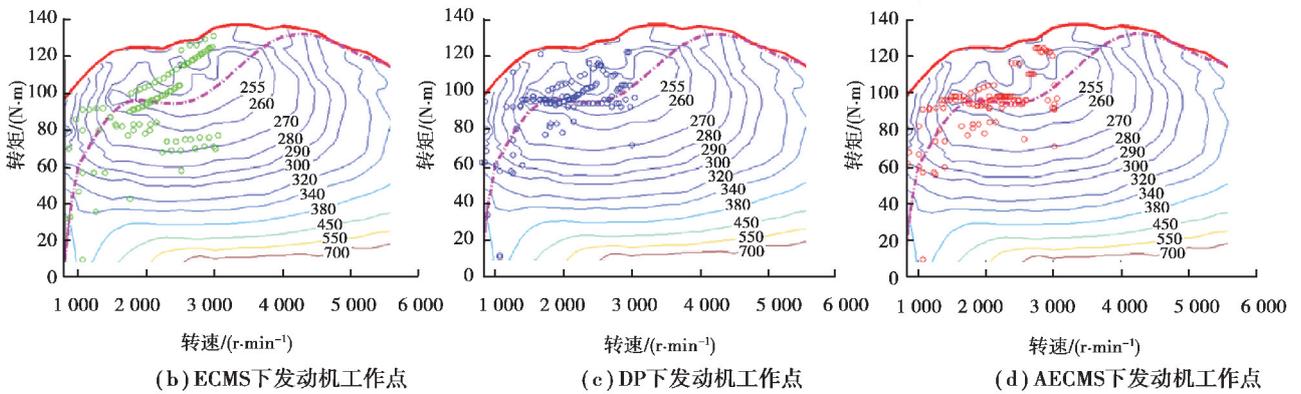
表 8 NEDC 工况下 3 种控制策略的燃油消耗

Table 8 Fuel consumption of three control strategies under NEDC condition

工况	终点 SOC			油耗/(L·(100 km) ⁻¹)			等效油耗/(L·(100 km) ⁻¹)		
	ECMS	DP	AECMS	ECMS	DP	AECMS	ECMS	DP	AECMS
NEDC	0.305 8	0.306 3	0.306 2	5.663	5.552	5.591	5.480	5.354	5.396
UDDS	0.300 3	0.300 8	0.300 0	5.213	5.036	5.146	5.204	5.013	5.146
HWFET	0.302 5	0.303 7	0.303 2	5.301	5.143	5.187	5.249	5.065	5.120
WLTP	0.302 3	0.303 4	0.303 1	5.856	5.666	5.771	5.822	5.615	5.725



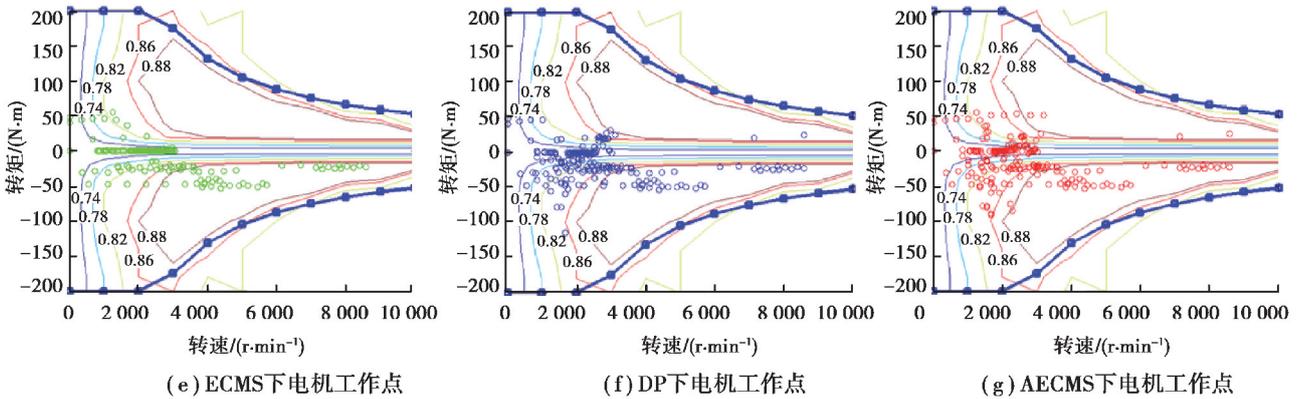
(a) 3种控制策略下的SOC轨迹



(b) ECMS下发动机工作点

(c) DP下发动机工作点

(d) AECMS下发动机工作点



(e) ECMS下电机工作点

(f) DP下电机工作点

(g) AECMS下电机工作点

图 12 CS 模式下 3 种控制策略的仿真结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation results of three control strategies in CS mode

4 结 语

为了提高混合动力电动汽车的燃油经济性,采用 DP 算法对不同典型工况和不同行驶距离下的最优 SOC 轨迹进行了仿真分析,得到了最优轨迹与行驶距离的一般规律。在此基础上,建立了单次充电行驶里程的概念,并提出了一种基于瞬时优化的等效油耗最低能量管理策略。通过对 ECMS、DP 和 AECMS 的燃油经济性进行仿真分析及对比,证明了所提出的 AECMS 的有效性。其中有以下 2 点重要发现:

1)在不同的行驶周期和不同的行驶距离下,基于 DP 的控制策略得到的 PHEV 的最优 SOC 轨迹是大致随行驶距离变化的直线。

2)仿真结果表明,在不同的工况和不同的单次充电行驶里程下,本研究中提出的 AECMS 比传统的 ECMS 具有更高的燃油经济性。与 ECMS 相比,AECMS 在 CD 模式下燃料消耗降低了 3.50%~8.71%,CS 模式下降低了 1.11%~2.46%。该控制策略的燃油经济性接近于 DP 控制策略,且克服了 DP 控制策略难以实时应用的不足。

参考文献:

- [1] Mohr S H, Wang J, Ellem G, et al. Projection of world fossil fuels by country[J]. Fuel, 2015, 141: 120-135.
- [2] Yu R, Ding J F, Zhong W F, et al. PHEV charging and discharging cooperation in V2G networks: a coalition game approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(6): 578-589.
- [3] 谢海明,黄勇,王静,等.插电式混合动力汽车能量管理策略综述[J].重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(7): 1-9.
Xie H M, Huang Y, Wang J, et al. Review of energy management strategies for plug-in HEVs[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(7): 1-9. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Peng J K, He H W, Xiong R. Rule based energy management strategy for a series-parallel plug-in hybrid electric bus optimized by dynamic programming[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1633-1643.
- [6] 罗国鹏,罗禹贡,李克强.基于最佳电能使用的插电式混合动力客车控制策略[J].汽车工程,2012,34(6): 475-478,490.
Luo G P, Luo Y G, Li K Q. Control strategy for plug-in hybrid electric bus based on optimal electric energy use[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(6): 475-478,490. (in Chinese)
- [7] Ramadan H S, Becherif M, Claude F. Energy management improvement of hybrid electric vehicles via combined GPS/rule-based methodology[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 586-597.
- [8] Denis N, Dubois M R, Desrochers A. Fuzzy-based blended control for the energy management of a parallel plug-in hybrid electric vehicle[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2015, 9(1): 30-37.
- [9] Ming L, Ying Y, Liang L J, et al. Energy management strategy of a plug-in parallel hybrid electric vehicle using fuzzy control[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2660-2665.
- [10] Meng D W, Zhang Y, Zhou M L, et al. Intelligent fuzzy energy management research for a uniaxial parallel hybrid electric vehicle[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017, 58: 447-464.
- [11] 程飞,赵韩,尹安东,等.插电式并联混合动力汽车模糊控制策略设计与仿真[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(9): 1159-1164.
Cheng F, Zhao H, Yin A D, et al. Design and simulation of fuzzy control strategy of plug-in parallel hybrid electric vehicle[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38(9): 1159-1164. (in Chinese)
- [12] 段骏华,马向华.基于动态规划算法的并联式混合动力汽车能源优化管理[J].兰州理工大学学报,2016,42(1): 86-90.
Duan J H, Ma X H. Optimal management of energy for parallel hybrid-power vehicle based on dynamic programming algorithm[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(1): 86-90. (in Chinese)
- [13] Xie S S, Sun F C, He H W, et al. Plug-in hybrid electric bus energy management based on dynamic programming[J]. Energy Procedia, 2016, 104: 378-383.
- [14] 杨亚联,蒲斌,胡晓松,等.ISG型速度耦合混合动力系统全局最优控制方法[J].重庆大学学报,2013,36(9): 71-77.
Yang Y L, Pu B, Hu X S, et al. Study on global optimization control strategy of ISG velocity coupling hybrid electric vehicle[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(9): 71-77. (in Chinese)

- [15] Kim N, Cha S, Peng H E. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(5): 1279-1287.
- [16] 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[J]. 汽车工程, 2014, 36(11): 1289-1294.
Zhao H, Wu D. A research on the control strategy of a parallel HEV based on stochastic model predictive control[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(11): 1289-1294. (in Chinese)
- [17] Chen Z Y, Xiong R, Wang C, et al. An on-line predictive energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles to counter the uncertain prediction of the driving cycle[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1663-1672.
- [18] Paganelli G, Delprat S, Guerra T M, et al. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains[C]// IEEE 55th Vehicular Technology Conference, May 6-9, 2002, Birmingham, AL, USA. IEEE, 2002: 2076-2081.
- [19] 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[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 75-84.
Zhang Y, Liu H P, Wu Y B. Multi-objective control strategy for parallel HEV using fuzzy logic[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 75-84. (in Chinese)
- [20] 欧阳, 周舟, 唐国强, 等. 自适应路况的插电式混合动力汽车能量管理策略[J]. 中国公路学报, 2016, 29(9): 152-158.
Ou Y, Zhou Z, Tang G Q, et al. Control strategy for plug-in hybrid electric vehicle based on self-adaptive road condition[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 152-158. (in Chinese)
- [21] Zhang F Q, Xi J Q, Langari R. An adaptive equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid electric vehicle based on fuzzy PI[C]// 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), June 19-22, 2016, Gothenburg, Sweden. IEEE, 2016: 460-465.
- [22] 张树彬. 插电式混合动力汽车自适应等效油耗能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
Zhang S B. Study on adaptive equivalent consumption energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [23] Xiao R X, Liu B S, Shen J W, et al. Comparisons of energy management methods for a parallel plug-in hybrid electric vehicle between the convex optimization and dynamic programming[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2): 218.

(编辑 罗 敏)