

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201907071



插电式混合动力汽车的燃油 经济性优化分析

陈亚伟¹, 邵毅明², 程前¹

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401147;

2. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘要: 针对速度变化对插电式混合动力汽车(PHEV)经济性的影响,提出一种顺序速度平滑控制策略.通过对给定交通约束条件下的速度曲线进行顺序平滑处理,优化充电策略,提高插电式混合动力汽车的燃油经济性.根据前车速度的预测值,在车辆与前车的可接受跟踪距离范围内,通过最小化加速度来平滑车速;采用最优的充电耗散策略,根据整个行程的信息,将电池充电延长到行程结束.通过对 3 种典型工况测试周期的组合,研究商用 PHEV 的连续优化对两种不同行驶模式的影响.仿真结果表明:所提出的顺序优化方法由于与车辆结构无关,实用性较高;由于在速度优化中使用线性车辆模型求解最优控制问题,因此计算过程的实时性较好;速度平滑控制方法使燃油消耗量减少 7%~14%.

关键词: 插电式混合动力汽车; 速度平滑; 能量管理; 燃油经济性; 充电策略

中图分类号: U 461.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2020)02-0150-06

Optimization Analysis of Fuel Economy of Plug-In Hybrid Electric Vehicle

CHEN Yawei¹, SHAO Yiming², CHENG Qian¹

(1. China Automotive Engineering Research Institute Limited Company, Chongqing 401147, China;

2. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: A sequential velocity smoothing control strategy was proposed for the impact of velocity changes on the economy of plug-in hybrid electric vehicles (PHEV). The fuel economy of plug-in hybrid electric vehicle was improved by smoothing the speed curves in a given traffic constraint in order to optimize the charging strategy. According to the predicted speed value of the car in front, within the acceptable tracking distance from it, the speed was smoothed by minimizing acceleration. Meanwhile, the optimal charging dissipation strategy was adopted to extend the battery charging to the end of the journey according to the information of the entire journey. The effect of continuous optimization of commercial PHEV on two different driving modes was studied by combining three typical test cycles. The simulation results show that the proposed sequential optimization method has high practicality because it has nothing to do with vehicle structure. Because the linear vehicle model is used to solve the optimal control problem in speed optimization, the real-time performance of the calculation process is better. Fuel consumption is reduced by 7% to 14%.

Keywords: plug-in hybrid electric vehicle; speed smooth; energy management; fuel economy; charging strategy

收稿日期: 2019-07-25

通信作者: 邵毅明(1955-),男,教授,博士,主要从事车辆主动安全及节能方面的研究. E-mail: sym@cqjtu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0100905)

采用生态驾驶(节能或经济驾驶)是提高汽车燃油经济性的有效途径. 先进驾驶辅助系统(ADAS)的发展,使生态驾驶与交通行程数据的结合成为现实. 将生态驾驶作为一个最优控制问题(OCP),在交通约束的前提下,通过对车速的控制,可以减少燃油消耗,这比仅对动力系统进行优化更能减少燃油消耗^[1-3]. 近年来,针对混合动力汽车的能量管理与生态驾驶的研究日益增多. 文献[4-7]指出,在有限交通预测的假设下,可以通过仅使用由行驶过程中分开的两个阶段来表示最佳轨迹;然后,应用两阶段 Pontryagin 的最值原理(PMP)分析推导出最优控制器的求解公式. 文献[8-10]提出一种具有不同更新频率和预测步长的 3 层预测控制方案,顶层计算凸优化问题中的动能和电能,对应的双变量作为状态参考和燃油消耗,通过求解瞬时优化的等效消耗最小化策略(ECMS),在实时决策层中以自适应的方式应用到控制系统中. 文献[11-13]将混合动力汽车的能量管理问题分为长预测层荷电状态(SOC)规划和短层速度与 SOC 规划相结合进行能量管理优化控制.

目前,虽然已经提出了较多的混合动力汽车的控制策略,但是插电式混合动力电动汽车的速度和充电损耗的协同优化仍是一大难题. 这是因为对于插电式混合动力汽车(PHEV)来说,电池荷 SOC 具有宽范围(通常在 10%~90%之间),增加了自由度,且难以选择最佳参考值^[14]. 针对上述问题,本文首先通过最小化加速度和制动来平滑车速,然后在所得到的平滑速度曲线上对发动机和电动机之间的功率进行分配,以最小化燃料消耗.

1 控制模型的建立

1.1 车辆跟随子系统

将车速和位置描述为速度优化问题的质点系统,即

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a. \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{z}=[s, v]^T$, s, v 分别表示车辆的位置和速度; a 是车辆的加速度.

根据车辆制动和加速极限要求,加速度极限为 $a_{\min}(t) \leq a(t) \leq a_{\max}(t)$, t 为发动机工作时长. 根据各路段限速,车速受 $v_{\min}(t) \leq v(t) \leq v_{\max}(t)$ 的约束,同时,车辆的位置也受到交通状况及前车的制约. 在任何时候,车辆应具有安全合理的车距,因此有 $s_{\min}(t) \leq s(t) \leq s_{\max}(t)$.

假设目标车辆的加速度 a 和速度 v 的约束条件在优化计算将要执行的时间范围内是不变的. 由于目标车辆的位置取决于其先前车辆的位置 s_L 和速度 v_L ,且受到时变约束,因此设置状态约束^[15]为

$$\left. \begin{aligned} s_{\min}(t) &= s_L(t) + v_L(t)L/10, \\ s_{\max}(t) &= s_L(t) + \begin{cases} v_L(t)d_{\max}, & v_L(t) < 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \\ v_L(t)d_{\min}, & v_L(t) \geq 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: L 为车长, $L=4.5 \text{ m}$; d 为横向车距,最大横向车距 $d_{\max}=3 \text{ m}$,最小横向车距 $d_{\min}=1.2 \text{ m}$.

1.2 混合动力子系统

该子系统根据 $(v, \dot{v}, T_e, \omega_e)$ 得到燃油消耗率 \dot{m}_f 和电池 SOC 的变化率 ΔSOC . 其中, v 和 \dot{v} 分别由生态路径和交通信息得到,再由生态路径提供给定路径数据和原始/目的地信息经济行驶路径.

电池荷电状态是 PHEV 电池耗散优化的主要状态,其值主要取决于电池功率 P_{batt} ,即

$$\Delta\text{SOC} = -\frac{V_{\text{oc}} - \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4P_{\text{batt}}R_{\text{batt}}}}{2C_{\text{batt}}R_{\text{batt}}}, \quad P_{\text{batt}} = P_{\text{MG1}} + P_{\text{MG2}}. \quad (3)$$

式(3)中: $V_{\text{oc}}, R_{\text{batt}}, C_{\text{batt}}$ 分别为电池的开路电压、内阻和额定电量; P_{MG1} 和 P_{MG2} 分别为发电机和电动机的功率^[16],有

$$P_{\text{MG1}} = T_{\text{MG1}} \cdot \omega_{\text{MG1}} + P_{\text{MG1,loss}}, \quad P_{\text{MG2}} = T_{\text{MG2}} \cdot \omega_{\text{MG2}} + P_{\text{MG2,loss}}. \quad (4)$$

式(4)中: $T_{\text{MG1}}, \omega_{\text{MG1}}$ 分别为发动机的扭矩和转速; $T_{\text{MG2}}, \omega_{\text{MG2}}$ 分别为电动机的扭矩和转速; $P_{\text{MG1,loss}}$ 和 $P_{\text{MG2,loss}}$ 分别为发电机和电动机的功率损耗,相关参数可查询. 给定车速 v ,电动机转速 $\omega_{\text{MG2}} = vK_1/R_{\text{tire}}$,其中, R_{tire} 为轮胎半径; K_1 为最终传动比.

根据驱动条件可知,驱动扭矩 T_{driver} 满足

$$T_{\text{driver}} = T_{\text{out}} - T_f, \quad T_f \geqslant 0. \tag{5}$$

式(5)中: T_f 为摩擦阻力矩; T_{out} 为动力系统输出扭矩.

以 v 和 \dot{v} 为输入,计算驱动所需扭矩 T_{driver} ,则有

$$m_{\text{eff}}\dot{v} = \frac{T_{\text{driver}}}{R_{\text{tire}}} - \frac{1}{2}\rho A_f C_d v^2 - C_f mg \cos \theta + mg \sin \theta. \tag{6}$$

式(6)中: m_{eff}, m, A_f 分别为车辆的等效质量、实际质量和迎风面积; C_f 为滚动阻力系数; C_d 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; θ 为路面坡度,假设 θ 为已知量且下坡为正; g 为重力加速度.

发电机、电动机和发动机的速度由动力分配装置(PSD,行星齿轮组)耦合得到,即

$$\omega_{\text{MG1}} S + \omega_{\text{MG2}} K_2 R = \omega_e (R + S). \tag{7}$$

式(7)中: S 和 R 分别为太阳齿轮和齿圈的半径; ω_e 为发动机转速; K_2 为电动机减速比.

发电机扭矩 T_{MG1} ,电动机扭矩 T_{MG2} ,发动机扭矩 T_e 和离合器扭矩 T_{cl} 的耦合关系如下:1) 在混合动力汽车(HV)和电动汽车(EV)模式下, $T_{\text{MG1}} + F \cdot S = 0, T_e - F \cdot (R + S) = 0$;2) 在双电机驱动(DM)模式下, $T_{\text{MG1}} + F \cdot S = 0, T_{\text{cl}} - F \cdot (R + S) = 0$.其中, F 为不同齿轮之间的相互作用力.离合器扭矩 T_{cl} 传递齿轮反作用力 F 时,发动机停止工作,且发电机产生反向扭矩.

发动机扭矩 T_e 和发电机扭矩 T_{MG1} 通过反作用力 F 结合到齿圈扭矩 T_r ,即 $T_r = F \cdot R$.

在输出轴上,由齿圈传递的扭矩与电动机传递的扭矩之和为 T_{out} ,即 $T_{\text{out}} = (T_{\text{MG2}} + K_2 T_r) K_1$.

根据发动机转矩 T_e 和发动机转速 ω_e 的关系,由实验测定的发动机特性静态图 φ 计算得到发动机的燃油消耗率 \dot{m}_f ,即 $\dot{m}_f = \varphi(T_e, \omega_e)$.

考虑到实际行驶情况,设置约束条件^[17],有

$$\left. \begin{aligned} \text{SOC}_{\min}(t) &\leqslant \text{SOC}(t) \leqslant \text{SOC}_{\max}(t), & P_{\text{batt}}^{\min}(t) &\leqslant P_{\text{batt}}(t) \leqslant P_{\text{batt}}^{\max}(t), \\ \omega_e^{\min}(t) &\leqslant \omega_e(t) \leqslant \omega_e^{\max}(t), & T_e^{\min}(t) &\leqslant T_e(t) \leqslant T_e^{\max}(t), \\ \omega_{\text{MG1}}^{\min}(t) &\leqslant \omega_{\text{MG1}}(t) \leqslant \omega_{\text{MG1}}^{\max}(t), & T_{\text{MG1}}^{\min}(t) &\leqslant T_{\text{MG1}}(t) \leqslant T_{\text{MG1}}^{\max}(t), \\ \omega_{\text{MG2}}^{\min}(t) &\leqslant \omega_{\text{MG2}}(t) \leqslant \omega_{\text{MG2}}^{\max}(t), & T_{\text{MG2}}^{\min}(t) &\leqslant T_{\text{MG2}}(t) \leqslant T_{\text{MG2}}^{\max}(t). \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

2 顺序优化方法

2.1 基于交通约束的速度平滑

通过使加速度最小化来平滑速度,将连续时间车辆跟随子系统转化为离散时间系统,得到离散时间下的线性时不变系统为

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{z}_k + \mathbf{B} \mathbf{a}_k, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & t_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5 t_s^2 \\ t_s \end{bmatrix}. \tag{9}$$

式(9)中: $\mathbf{z}_k = [s_k, v_k]^T$ 为车辆状态; a_k 为时刻 k 的加速度; t_s 为采样时间;状态变量 $\mathbf{X} = [\mathbf{z}_1^T, \mathbf{z}_2^T, \cdots, \mathbf{z}_N^T]$, N 为步长上限;控制输入变量 $\mathbf{U} = [a_0, a_1, \cdots, a_{N-1}]^T$.由顺序控制输入 \mathbf{U} 可以得到执行的最小化加速度值,该问题可以转化为多维约束优化问题.目标函数 J_1 具有以下形式

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{U}} J_1 &= \mathbf{U}^T \mathbf{U}, \\ \text{s. t. } \mathbf{D} \mathbf{U} &\leqslant \mathbf{W} + \mathbf{T}_{\mathbf{z}}. \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

式(10)中: \mathbf{D} 为约束向量; \mathbf{W} 为交通约束矢量; \mathbf{T} 为扭矩向量; $\mathbf{z}_0 = [s_0, v_0]^T$ 是车辆的初始位置和速度.控制约束可由状态约束得到,这是一个标准线性二次(LQR)最优控制问题,用 Matlab 二次规划(QP)求解器求解.

2.2 最低油耗问题的规划

在连续时间内,对最低油耗问题进行数学规划,则

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{u}} J_2 &= \int_0^{t_f} \dot{m}_f(x, \mathbf{u}, \boldsymbol{\omega}) dt, \\ \text{s. t. } \dot{x} &= f(x, \mathbf{u}, \boldsymbol{\omega}), \quad x(0) = x_0, \quad x(t_f) = x_f, \quad u(t) \in \Omega. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式(11)中: J_2 为油耗函数; $x = \text{SOC}$; $\mathbf{u} = [\omega_e, T_e]^T$; $\boldsymbol{\omega} = [T_{\text{driver}}, v]^T$.

该问题的哈密顿形式为

$$H = \dot{m}_f + p \Delta \text{SOC}.$$

(12)

根据 Pontryagin 的最值原理(PMP)的必要条件,原始最优控制问题的解^[8]需要满足

$$\left. \begin{aligned} u^* &= \arg \min_u H, \quad u = \Omega, \\ \dot{x} &= f(x, u, \omega), \quad x(t_0) = x_0, \quad x(t_f) = x_f, \\ L &= \dot{m}_f, \quad \dot{p} = - \left[\frac{\partial f}{\partial x} \right]^T p - \left[\frac{\partial L}{\partial x} \right]^T. \end{aligned} \right\}$$

(13)

最后,对两点边值问题(TPBVP)进行数值求解.

3 控制器性能评价与分析

3.1 制定基线能量管理策略

1) 耗散电量(CD). 强制系统在电动汽车(EV)模式下运行,此时 $T_e=0, \omega_e=0$,直到电池 SOC 低于指定的终端 SOC 值,车辆将立即进入混合动力汽车(HV)模式. 车辆即将进入 HV 模式时刻的 SOC 值记为 SOC(th).

2) 充电持续(CS). 用 $\text{SOC}_0=\text{SOC}(\text{th})$ 来制定剩余行程的最低油耗问题. 车辆在 HV 模式下运行,其中, T_e 和 ω_e 是通过优化算法确定的,这有助于实现剩余行程的最低油耗. 在此期间,电池以与生产 PHEV 上的充电维持模式类似的方式辅助发动机.

3.2 两种组合行驶模式的评价

为了评估控制器的性能,通过组合 3 种典型的测试循环来创建不同的行驶模式,包括城市道路循环(UDDS)、公路燃油经济性测试(HWFET)和 US06 补充测试工况. 选取两种场景作为两种极端情况,以此评价不同行驶模式的燃油经济性,两种组合行驶模式,如表 1 所示.

1) 最差 CDCS 行程. 此种工况下, CDCS 策略在真实速度曲线上的结果远非最佳. 该行程在开始时需要高功率,采用最佳耗散策略时,发动机

一开始就会处于结合状态,这可以储存更多的电能以供后续行程使用. 但因为最初的高功率需求,电能将很快耗尽,发动机必须在行程的其余部分进行接合,以保持最低 SOC 水平.

2) 最佳 CDCS 行程. 此种工况下, CDCS 策略在真实速度曲线上的结果接近最优. 该行程开始时动力需求低且车速高,因此,系统首先使用电池中的电能,当高功率需求的行程结束时,再结合发动机.

最差 CDCS 行程总行程距离为 107.62 km,行程时长为 2 h 4 min 5 s. 最佳 CDCS 行程总行程距离为 124.12 km,行程时长为 2 h 16 min 51 s. 在这两种情况下,所述循环的总行程能量都超过了模拟车辆的可用电池能量,表明所提出的充电耗散策略具有一定的效果,可以节省燃油消耗. 车辆仿真中设计的速度和能量管理策略,如表 2 所示.

表 2 车辆仿真中设计的速度和能量管理策略

Tab. 2 Speed and energy management strategies designed in vehicle simulation

模式	车速类型	能量管理	模式	车速类型	能量管理
RV-CDCS	实际值	混合模式(HV)持续充电,电动模式(EV)耗电	RV-OCBD	实际值	最优混合充电
SV-CDCS	平滑	混合模式(HV)持续充电,电动模式(EV)耗电	SV-OCBD	平滑	最优混合充电

4 仿真结果分析

两种不同行驶模式的仿真结果,如图 1 所示. 图 1 中: P_D 为驱动功率; G 为燃油消耗质量. 由图 1 可知:在最差 CDCS 行程中,速度和电能耗散顺序优化策略(SV-OCBD)的总油耗比实际速度曲线上的基线耗散策略(RV-CDCS)降低了 13.74%;而在最佳 CDCS 行程中,相对于实际速度曲线上的基线耗散

策略(RV-CDCS),速度和电能耗散的顺序优化策略(SV-OCBD)总油耗降低了 7.07%.

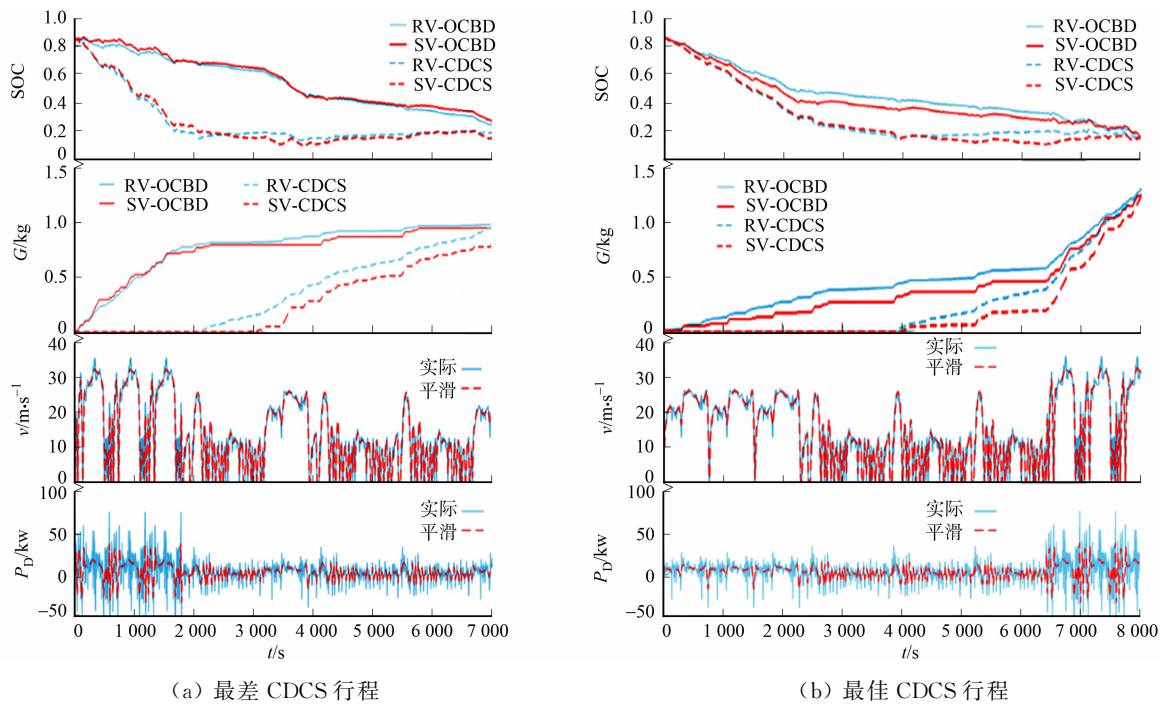


图 1 两种不同行驶模式的仿真结果

Fig. 1 Simulation results of two different driving modes

在最差 CDCS 行程中,RV-OCBD 策略相对于 RV-CDCS 策略有更好的效果,不仅使发动机在进入混合动力(HV)模式后在最高效点工作,而且在后续行程中仍持续输出动力.

不同情况下的燃料消耗、发动机启动时间和能耗结果,如表 3 所示.表 3 中: δ 为燃油减少占比; Q_B 为制动能量; Q_D 为驱动能量; S 为纯电动行驶里程.由表 3 可知:与 RV-CDCS 策略相比,RV-OCBD 策略减少了发动机在中功率区域运行的总时间;与给出的最佳 SOC 耗散策略相比,基于实际速度的基线策略具有更长的发动机运行时间;然而,对于最佳的 CDCS 行程,在行程开始时的功率需求是中等负荷,而在行程结束时出现高功率需求,这不利于节省电能以增加续驶里程.因此,与 RV-OCBD 策略相比,在行程的后半段使用发动机的 RV-CDCS 策略是最优的.

表 3 不同情况下的燃料消耗、发动机启动时间和能耗结果

Tab. 3 Fuel consumption, engine start time and energy consumption results under different conditions

行驶模式	模式	SOC(0)=0.85 SOC(t _f)=0.15	G/kg	$\delta/\%$	t/h	$Q_B/\text{kW}\cdot\text{h}$	$Q_D/\text{kW}\cdot\text{h}$	S/km
最差的 CDCS 行程	RV-CDCS	实际车速	1.107	0	13.49	4.93	13.71	41.79
	RV-OCBD	实际车速	1.041	6.01	11.53	4.93	13.71	41.79
	SV-CDCS	平滑车速	1.010	9.65	12.21	3.18	11.91	49.16
	SV-OCBD	平滑车速	0.956	13.71	11.23	3.19	11.91	49.16
最佳的 CDCS 行程	RV-CDCS	实际车速	1.374	0	13.43	5.16	15.31	63.26
	RV-OCBD	实际车速	1.359	1.10	13.99	5.16	15.31	63.26
	SV-CDCS	平滑车速	1.278	6.96	13.48	3.29	13.39	65.74
	SV-OCBD	平滑车速	1.277	7.07	13.71	3.29	13.39	65.74

最佳 CDCS 行程的仿真结果表明,平滑速度即使对电池充电的效率优化较低,也能显著提高插电式混合动力汽车的燃油经济性;同时,平滑的速度也有助于汽车的稳定性和舒适性.

5 结论

在给定交通约束条件下,对一种轻型插电式混合动力汽车(PHEV)的速度曲线顺序优化的方法及相应的充电损耗策略进行研究.为了评价该方法的有效性,给出并分析两种不同功率需求模式下的行程

结果. 仿真结果表明,混合动力汽车的燃油消耗有所下降,所设计的顺序控制策略具有一定的优越性. 由此得到以下3点结论.

1) 平滑的速度策略显著降低了平均功率需求. 行程开始时,较低的电需求使在切换到表3的混合模式之前(使用CDCS),可以行驶更长的里程.

2) 降低发动机驱动力比优化充电效率更能减小总的燃油消耗. 即与RV-CDCS策略相比,SV-CDCS策略具有更好的节能性.

3) 速度平滑与电能损耗之间有耦合性. 由于加速度最小化的控制方法减小了不必要的制动,SV情况下电池SOC的下降高于RV情况下电池SOC的下降. 总的来说,SV减少了再生制动的机会,它避免了一些制动的操作和不必要的加速,因此,其节能效果更好.

参考文献:

- [1] HU Jia, SHAO Yunli, SUN Zongxuan, *et al.* Integrated optimal eco-driving on rolling terrain for hybrid electric vehicle with vehicle-infrastructure communication[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 68: 228-244. DOI: 10. 1016/j. trc. 2016. 04. 009.
- [2] 王天泽. 低温运行状态下插电式混合动力客车能量管理策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [3] 李悦. 考虑电池衰减特性的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [4] SCIARRETTA A, de NUNZIO G, OJEDA L L. Optimal ecodriving control: Energy-efficient driving of road vehicles as an optimal control problem[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2015, 35(5): 71-90. DOI: 10. 1109/MCS. 2015. 2449688.
- [5] 周雯雯. 插电式混合动力汽车控制策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [6] ZULKEFLI M A M, ZHENG Jianfeng, SUN Zongxuan, *et al.* Hybrid powertrain optimization with trajectory prediction based on inter-vehicle-communication and vehicle infrastructure integration[J]. *Emerging Technologies*, 2014, 45: 41-63. DOI: 10. 1016/j. trc. 2014. 04. 011.
- [7] 闫斌. 插电式混合动力车辆动力品质和燃油经济性控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [8] KIM T S, MANZIE C, SHARMA R. Two-stage optimal control of a parallel hybrid vehicle with traffic preview [C]//18th IFAC World Congress, Milano: International Federation of Automatic Control, 2011: 2115-2120. DOI: 10. 3182/20110828-6-it-1002. 03423.
- [9] 赵永刚. 插电式混合动力客车能量管理全局优化[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [10] JOHANNESSON L, MURGOVSKI N, JONASSON E, *et al.* Predictive energy management of hybrid longhaul trucks[J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 41(5): 83-97. DOI: 10. 1016/j. conengprac. 2015. 04. 014.
- [11] 王光平. 并联插电式混合动力汽车控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [12] HEPPELER G, SONNTAG M, WOHLHAUPTER U, *et al.* Predictive planning of optimal velocity and state of charge trajectories for hybrid electric vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2017, 61(32): 229-243. DOI: 10. 1016/j. conengprac. 2016. 07. 003.
- [13] 解庆波. 基于驾驶意图与行驶工况的混合动力电动汽车能量管理策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [14] PRAKASH N, CIMINI G, STEFANOPOULOU A G, *et al.* Assessing fuel economy from automated driving: Influence of preview and velocity constraints[C]//ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference, Minneapolis: ASME, 2016: 221-230. DOI: 10. 1115/DSCC2016-9780.
- [15] 白琴. 插电式混合动力汽车能量管理控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [16] CHEN Di, KIM Y, STEFANOPOULOU A G. State of charge node planning with segmented traffic information [C]//Annual American Control Conference, Milwaukee: IEEE Press, 2018: 38-42. DOI: 10. 23919/ACC. 2018. 8431103.
- [17] 曾育平, 秦大同, 苏岭, 等. 插电式混合动力汽车动力系统的成本、油耗和排放多目标参数优化[J]. *汽车工程*, 2016, 38(4): 397-402, 434. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-680X. 2016. 04. 001.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 崔长彩)