

12-12-2019

PSHEV Cold Start Emission Simulation Based on Electric Heated Catalyst Pre-heating

Deng Tao

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

Haoyuan Yu

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

Zhifei Li

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

Haixin Tan

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

PSHEV Cold Start Emission Simulation Based on Electric Heated Catalyst Pre-heating

Abstract

Abstract: In order to reduce the emissions of the plug-in series hybrid electric vehicle (PSHEV) during the cold start phase, a vehicle model on PSHEV is established and a dynamic model of electrically heated catalyst system (EHCS) based on optimization and control strategy of engine start-stop is built. The PSHEV energy management control strategy based on EHCS preheating is proposed. The influence of different pre-heating power on EHCS temperature is simulated. By comparing SOC value of the control strategy with the original control strategy; and comparative analysis of cold start emissions of three elements catalyst under three strategies of pre-heating, post-heating and non-heating; it is found that PSHEV with 2kW preheat 150s engine start and stop optimization of the control strategy can reduce the cold start HC / CO emissions at price of a small fuel consumption costs.

Keywords

PSHEV, cold start, EHCS (electrically heated catalyst system), control strategy, simulation

Recommended Citation

Deng Tao, Yu Haoyuan, Li Zhifei, Tan Haixin. PSHEV Cold Start Emission Simulation Based on Electric Heated Catalyst Pre-heating[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1150-1157.

电加热三元催化剂预热的 PSHEV 冷起动排放仿真

邓涛, 余浩源, 李志飞, 谭海鑫

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为进一步降低插电式串联混合动力汽车(Plug-in Series Hybrid Electric Vehicle, PSHEV)冷起动阶段的排放, 对 PSHEV 进行整车建模, 基于发动机的起停优化控制策略, 建立电加热三元催化剂(Electrically Heated Catalyst System, EHCS)动力学模型, 并提出基于 EHCS 预热的 PSHEV 能量管理控制策略。仿真分析不同预热功率对 EHCS 温度的影响, 对比该控制策略与原控制策略 SOC 值, 并对比分析三元催化剂预热、后加热以及不加热三种策略下的冷起动排放。结果表明, PSHEV 采用 2 kW 预热 150 s 的发动机起停优化的控制策略能以微小的燃油消耗代价, 减少冷起动时 HC/CO 排放量。

关键词: 插电式串联混合动力汽车; 冷起动; 电加热三元催化剂; 控制策略; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 06-1150-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0212

PSHEV Cold Start Emission Simulation Based on Electric Heated Catalyst Pre-heating

Deng Tao, Yu Haoyuan, Li Zhifei, Tan Haixin

(School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to reduce the emissions of the plug-in series hybrid electric vehicle (PSHEV) during the cold start phase, a vehicle model on PSHEV is established and a dynamic model of electrically heated catalyst system (EHCS) based on optimization and control strategy of engine start-stop is built. The PSHEV energy management control strategy based on EHCS preheating is proposed. The influence of different pre-heating power on EHCS temperature is simulated. By comparing SOC value of the control strategy with the original control strategy; and comparative analysis of cold start emissions of three elements catalyst under three strategies of pre-heating, post-heating and non-heating; it is found that PSHEV with 2kW preheat 150s engine start and stop optimization of the control strategy can reduce the cold start HC / CO emissions at price of a small fuel consumption costs.

Keywords: PSHEV; cold start; EHCS (electrically heated catalyst system); control strategy; simulation

引言

插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)是一种兼具纯电动汽车和混合动力

汽车优点的新能源汽车。由于大部分能量来自于电能, 所以排放相比于传统汽车来说也相对较小。面对当前越来越严格的排放标准, 降低其排放仍有很大的意义。

从欧III排放开始, 循环工况的测试已经包括了冷起动的废气排放采样, 它在整个排放测试中占到了总排放量的 80%左右^[1]。传统的三元催化剂在减少发动机所排放的 CO、HC 和 NO_x 有着重要的意



收稿日期: 2017-05-15 修回日期: 2017-06-23;
基金项目: 国家自然科学基金(51305473), 中国博士后科学基金(2014M552317), 重庆市博士后研究人员科研项目特别资助(xm2014032);
作者简介: 邓涛(1982-), 男, 江西, 博士, 教授, 研究方向为混合动力电动汽车控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1150 •

义^[2]。但催化剂只有在蜂窝层温度达到起燃温度之后才会有较高的转化效率,在低于催化剂起燃温度时转化效率相当低^[3]。因此在汽车冷启动时应尽快使三元催化剂达到起燃温度,减少冷启动排放。插电式串联混合动力汽车能将发动机调整到最佳工作点附近工作,避免了怠速和低速运转工况,减少发动机排放。插电式串联混合动力汽车在催化剂达到起燃温度后排放量很稳定且很少,因此冷启动时排放量占到了工况循环的很大一部分。针对冷启动排放,国内外主要采用能量管理策略和 EHCS 来减小冷启动排放。隗寒冰等^[4]采用时间最优控制策略加快混合动力汽车三元催化剂起燃; Dongsuk Kum 等^[5]在采用 DP (dynamic-programming) 算法优化 PHEV 能量管理时考虑了冷启动时催化剂温度; 李峰^[6]等开发了针对 PHEV 的热管理系统,利用电动机热量为发动机预热来改善冷启动时发动机工作效率并减少冷启动排放; 曾育平^[7]等采用近似极小值算法优化 PHEV 能量管理时考虑了催化剂温度以及发动机冷却液温度。以上通过能量管理主要是避免发动机频繁起停造成的催化剂温度减小而引起的冷启动排放增加,该方法能减少少量的冷启动排放,同时也有微小的油耗代价。隗寒冰等^[8]研究了混合动力汽车 EHCS 不同加热能量以及加热位

置对混合动力汽车排放和燃油消耗的影响。Ramanathan 等^[9]研究了 EHCS 在混合动力车上的应用,并建立了相应的模型。使用 EHCS 减小冷启动排放采用的是后加热模式,该加热模式主要是利用热源来加快催化剂蜂窝层达到起燃温度,虽然该方式能减少一部分冷启动排放^[10],但效果并不明显。

本文利用 PSHEV 具有纯电动里程长、动力电池容量大且可依靠电动机单独驱动的优点,与 EHCS 相联系,建立适用于整车的 EHCS 动力学模型,提出基于 EHCS 预热的发动机起停优化控制策略来减少冷启动排放,并进行仿真分析分析不同预热功率对 EHCS 温度的影响和采用不同控制策略时的 SOC 值变化。最后对比分析采用该控制策略进行 EHCS 预热、发动机启动之后的 EHCS 后加热、以及未采用 EHCS 加热时冷启动排放以及整个工况排放比较。

1 研究对象

PSHEV 主要由发动机、驱动电机、ISG 电机、动力电池以及机械传动装置等组成,如图 1 所示,其中 ISG 电机从发动机获取能量为动力电池充电和驱动电机。具体整车性能参数和关键部件参数分别如表 1 和表 2 所示。

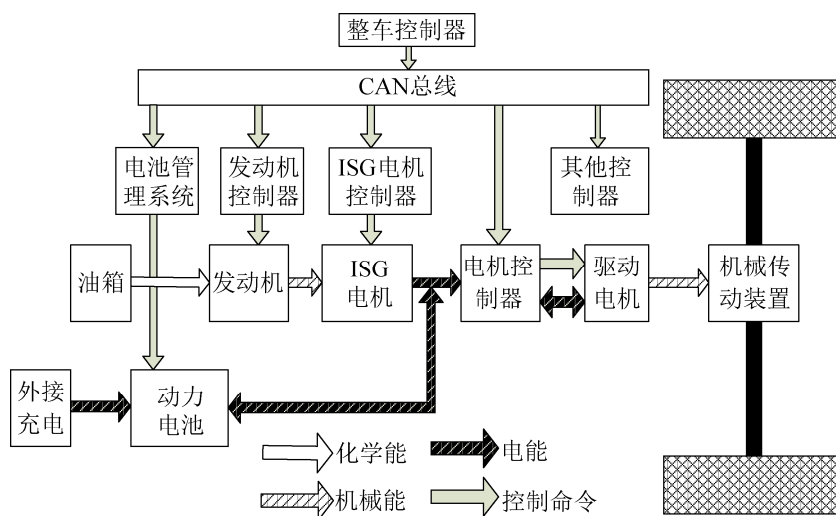


图 1 动力系统结构示意图
Fig. 1 Power system structure diagram

表 1 关键部件参数
Tab. 1 Key component parameters

部件名称	参数	数值
驱动电机	额定功率/kW (转速/r.min ⁻¹)	33 (2 900)
	峰值功率/kW (转速/r.min ⁻¹)	72 (2 900)
动力电池	容量/A·h	56
	可放电能量/kW·h	18
ISG 电机	额定功率/kW (转速/r.min ⁻¹)	33 (2 400)
	额定转矩/N·m	55
发动机	最大功率/kW (转速/r.min ⁻¹)	41 (6 000)
	最大转矩/N·m (转速/r.min ⁻¹)	87 (3 200)

表 2 整车参数
Tab. 2 Vehicle parameters

参数	数值
整车外形尺寸(长×宽×高)/mm	4 530×1 689×1 450
整备质量/kg	1 384
最大质量/kg	1 900
30 min 最高车速/km·h ⁻¹	130
30 km/h 的最大爬坡度/%	≥20.3
0~100 km/h 起步加速时间/s	≤16.9
纯电动行驶里程/Km	60

2 PSHEV 能量管理策略

2.1 逻辑门限控制策略

PSHEV 能量管理策略一般分为电量消耗和电量维持模式。电量消耗模式一般只消耗动力电池能量来实现纯电动行驶,而在电量维持模式下主要消耗的是发电机通过发动机消耗燃油所产生的电能。本文采用逻辑门限控制策略来控制电量消耗和电池维持两种模式的动态切换: 电池 SOC 值下降到下限时发动机就起动机为行驶供能,并将多余的电能储存到动力电池中。原车 SOC 上限值为 0.9, 下限值为 0.3。

2.2 基于发动机起停优化的控制策略

普通逻辑门限控制策略在已知工况和里程时,不能保证在工况结束时动力电池电量刚好处于 SOC 的下限值附近,从而不能充分的利用来自电网的低价能量,并且发动机运行时间及起动机次数也会增多,增加排放量。因此,可以在纯电动时起动机和在行车充电时关闭发动机^[11],减少发动机

运行时间和起动机次数,降低排放。本文只考虑行车充电时关闭发动机,采用基于发动机起停优化的逻辑门限能量管理控制策略。此时的 SOC 值为:

$$SOC_{eng,off} = 30\% + 1.11\% \times 2.5\% \times \left(\frac{D - AER}{1.11 + 2.5} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: D 是行驶里程; AER 是纯电动行驶里程; 1.11%为 NEDC 工况纯电动行驶每公里 SOC 值下降均值; 2.5%为行车充电时每公里 SOC 值下降均值。

图 2 为 NEDC 工况行驶 100km 逻辑门限控制策略与基于发动机优化起停控制策略 SOC 值比较。从图中可以看出,采用发动机起停优化控制策略时,发动机起动机时间明显少于逻辑门限控制策略,并在行驶工况结束时的 SOC 值达到下限值,充分利用动力电池中的电能。

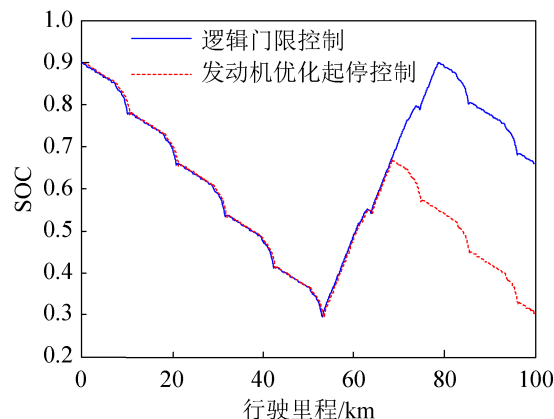


图 2 优化后 NEDC 工况下 SOC 值变化

Fig. 2 SOC value change after optimization under NEDC

3 EHCS 动力学模型

本文所研究的电加热三元催化剂 EHCS 是由传统的三元催化剂加上金属衬底,这就意味着三元催化剂蜂窝层可以直接通过电能进行加热。EHCS 对 PSHEV 的加热策略分为两种,一种是在纯电动行驶时的 EHCS 预热,第二种是采用发动机起动机后的后加热。在预热模式时没有废气通过 EHCS,因此不会产生由化学反应生成的热量。发动机起动机后 EHCS 有大量的废气通过,会产生大量的催化转化热量。因此两种加热模式的动力学模型有所不同。

3.1 预热模型

在预热模式下, 没有废气通过 EHCS, 所以没有化学反应所产生的热量。因此可以采用固相能量守恒来表示预热模式下的热力学模型^[12]:

$$cm \frac{dT}{dt} = P(t) + \varepsilon \delta S(T^4 - T_a^4) + h_{\text{air}} S(T_a - T) \quad (2)$$

式中, c 是 EHCS 质量定压热容; m 是 EHCS 的质量; T 是 EHCS 温度; T_a 为环境温度; $P(t)$ 是电源所提供的能量; ε 玻耳兹曼常数; δ 是热辐射率; S 是 EHCS 外表面面积; h_{air} 是空气的对流换热系数。

3.2 后加热模型

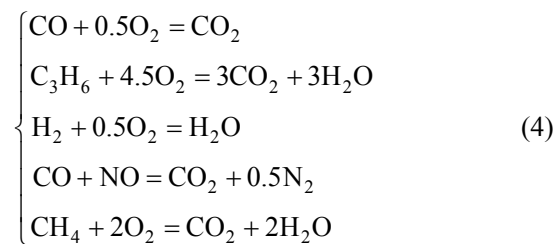
当废气流入 EHCS 时, 有大量催化转化反应所释放的热, 因此后加热模型中包含了催化转化反应所放出的热量, 以及废气与催化剂蜂窝层之间的热交换。后加热模型可表示^[12]为:

$$cm \frac{dT}{dt} = P(t) + \dot{Q}_{\text{gen}} + \varepsilon \delta S(T^4 - T_a^4) + h_{\text{gas}} A(T_{\text{gas}} - T) + h_{\text{air}} S(T_a - T) \quad (3)$$

式中: h_{gas} 是废气与 EHCS 的对流换热系数; A 是废气与 EHCS 蜂窝层的接触面积; T_{in} 是废气在进气口的温度; \dot{Q}_{gen} 是 EHCS 内废气反应所产生的热量。

3.3 EHCS 中的主要反应

发动机冷启动时排出的废气主要由不完全燃烧的 HC 和 CO 组成^[13]。主要考虑以下反应:



由 HC, CO 反应所产生热量可由公式^[8]描述为:

$$\dot{Q}_{\text{gen}} = \frac{\dot{m}_a \left(1 + \frac{\varphi}{\varphi_{\text{ideal}}} \right)}{\dot{m}_{\text{exh}}} \left[\eta_{\text{CO}} m_{\text{CO}} \Delta Q_{\text{CO}} + \eta_{\text{HC}} m_{\text{HC}} \cdot \left(0.86 \frac{\Delta Q_{\text{C}_3\text{H}_6}}{3} + 0.14 \Delta Q_{\text{CH}_4} \right) \right] \quad (5)$$

式中: η_{CO} 是 EHCS 内 CO 转化效率; η_{HC} 是 HC

转化效率; \dot{m}_a 为废气的质量流量; φ_{ideal} 为理想空燃比; m_{CO} , m_{HC} 分别是 CO、HC 的分子质量; \dot{m}_{exh} 是废气平均分子质量; ΔQ_{CO} 是 CO 催化反应产生的热量; ΔQ_{CH_4} 是 HC 中 CH₄ 催化反应产生的热量; $\Delta Q_{\text{C}_3\text{H}_6}$ 是 HC 中丙烯催化反应产生的热量。

3.4 氧储存模型

EHCS 中氧气含量(即过量空气系数), 对蜂窝层内反应有很大的影响, 从而影响三元催化剂的转化效率。所以要精确的建立 EHCS 中氧储存模型来对废气中的氧气浓度进行计算。EHCS 中氧气储存和释放的过程可描述为:

$$\frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{C_{(V_{\text{FG}})}} \rho(\lambda_{\text{FG}}, \theta) \cdot 0.21 V_{\text{FG}} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\text{FG}}} \right), & 0 < \theta < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ 是 EHCS 中氧气含量变化率; V_{FG} 为流入 EHCS 中的空气速率; C 是 EHCS 的有效容积; λ_{FG} 是等效空燃比; ρ 是 EHCS 与流进的废气之间的氧气交换率可表示为:

$$\rho \lambda_{\text{FG}}, \theta = \begin{cases} a_L f_L(\theta), & \lambda_{\text{FG}} > 1 \\ a_R f_R(\theta), & \lambda_{\text{FG}} < 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_R = (e^{-9\theta} - 1) / (e^{-9} - 1)$$

$$f_L = (1 - e^{6\theta}) / (e^6 - 1)$$

式中: f_L 是吸附到 EHCS 中的氧气量; f_R 是从 EHCS 释放的氧气量; a_L , a_R 是修正系数。

3.5 转化效率模型

EHCS 的转化效率主要是受蜂窝层温度和内部氧气分数影响, 所以转化效率是 T 与 λ_{FG} 的二元函数, 简化计算式^[8]为:

$$\eta = \left\{ 1 - \exp \left[-a_1 \left(\frac{T - T_0}{\Delta T} \right)^{m_1} \right] \right\} \cdot \left\{ -\exp \left[-a_2 \left(\frac{\lambda_{\text{FG}} - \lambda_{\text{FG}_0}}{\Delta T} \right)^{m_2} \right] \right\} \quad (8)$$

式中: T_0 是起燃温度; m , a 是常数。

4 基于 EHCS 预热的 PSHEV 能量管理策略

EHCS 预热需要在 PSHEV 发动机启动之前将 EHCS 预热到起燃温度以上,但由于车辆在预热过程中整车功率未知,不能保证在发动机启动之前有效的控制 EHCS 预热。本文采用的三元催化剂预热控制方式为:车辆在行驶之前获取行驶工况,当车辆行驶距离超过纯电动行驶里程时会启动发动机,当以纯电动行驶到 EHCS 预热的阈值时,开始 EHCS 预热模式。当预热时间结束后,系统记录 SOC 值,并同时启动发动机,计算出行车充电时发动机关闭 SOC 值以减少发动机启动时间以及保证在里程结束时 SOC 值处于下限值,如图 3 所示。

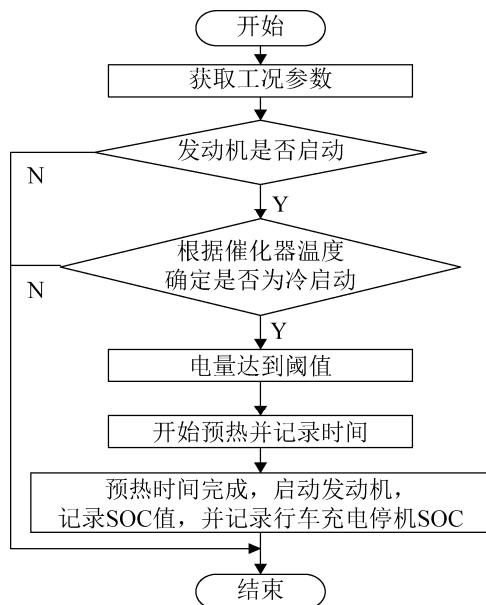


图 3 基于 EHCS 预热的控制策略

Fig. 3 Control strategy based on EHCS pre-heating

EHCS 预热 SOC 阈值根据整车在 NEDC 工况下纯电动行驶的最大功率与 EHCS 预热时间下所消耗的 SOC 值:

$$SOC_{EHCS} = \left(\frac{P_{\max} t_{EHCS}}{Q_{\text{bat}}} \right) \times 100\% + 30\% \quad (9)$$

式中: P_{\max} 是纯电动行驶时整车最大功率; t_{EHCS} 是 EHCS 预热时间; Q_{bat} 是动力电池容量。

当 EHCS 预热完成后, SOC 值并没有达到下限值,此时启动发动机。读取当前 SOC 值,记为 $SOC_{\text{eng_on}}$,计算出行车充电时发动机停机 SOC 值。

$$SOC_{\text{eng_off}} = SOC_{\text{eng_on}} + (1.1\% \times 2.5\%) \times \left(\frac{D - AER}{1.1 + 2.5} \right) \times 100\% \quad (10)$$

考虑电池放电效率;发动机工作效率;ISG 电机充电效率,可以将 EHCS 预热以及后加热所消耗的能量转化为燃油的消耗量,转化公式为:

$$g_e = \frac{Q_{EHCS}}{h_u \eta_e \eta_{\text{isg}} \eta_{\text{dis}} \eta_{\text{ch}}} \quad (11)$$

式中: h_u 是燃油低热值; η_e 是发动机的工作效率; η_{isg} 是 ISG 电机发电效率; η_{ch} , η_{dis} 分别是动力电池充放电效率。

5 仿真结果分析

基于 Matlab/Simulink 软件建立插电式串联混合动力汽车用 EHCS 电加热过程的数学模型,仿真参数如表 3 所示,以此分析不同预热功率下温度上升速率以及到达催化剂起燃温度所需的时间。以 100 km 的 NEDC 作为仿真工况,如图 4 所示,假设动力电池充满电(SOC 值为 0.9),对比分析采用 EHCS 预热、后加热和未加热时的排放。

表 3 仿真主要参数
Tab. 3 Simulation of the main parameters

参数	数值
催化剂质量定压热容/(J/kg·K)	460
催化剂质量/kg	0.6
催化剂与环境热辐射率	0.2
催化剂进气管表面积/m ²	0.03
催化剂蜂窝层接触面积/m ²	2.36
催化剂壳体外表面积/m ²	0.42

5.1 EHCS 不同预热功率的仿真结果

图 5 所示为采用不同的预热功率对 EHCS 加热时蜂窝层温度随时间变化的仿真结果。显然,1 kW 功率预热不能达到催化剂起燃温度;3 kW 预热功率蜂窝层温度上升虽然迅速,但预热温度稳定后催

化剂蜂窝层温度达到 400 °C 以上, 且整车功率可能处于峰值, 影响整车性能; 而采用 2 kW 的加热功率能在 100 s 后维持蜂窝层温度在 300 °C 以上, 在 150 s 后能稳定将蜂窝层温度维持在 315 °C 左右。所以, 后续仿真都采用 2 kW 且预热 150 s 的方案。

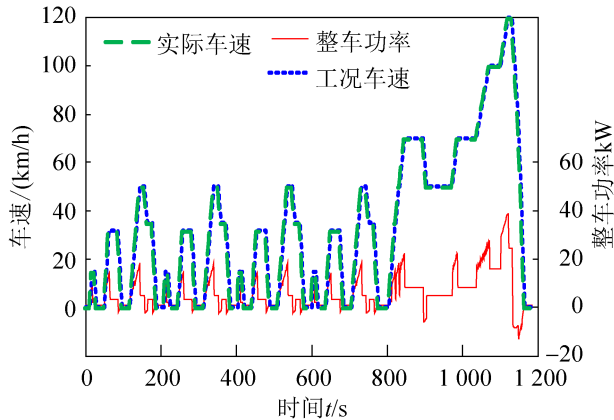


图 4 NEDC 工况下的车速及整车功率

Fig. 4 Vehicle speed and vehicle power under NEDC cycle

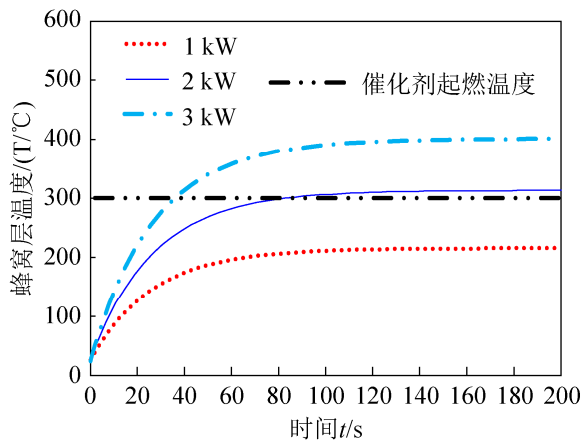


图 5 不同预热功率下蜂窝层温度随时间变化

Fig. 5 Temperature of the catalyst layer varies with time under different preheat power

5.2 EHCS 预热控制策略 SOC 值仿真结果

图 6 所示为采用基于 EHCS 预热的发动机起停优化控制策略时的 SOC 值与原有逻辑门限控制策略以及发动机起停优化控制策略的 SOC 值比较。采用 EHCS 预热控制策略时在 SOC 值为 0.38 的 EHCS 预热阈值时开始预热模式, 在 150 s 之后预热完成, SOC 值到达 0.35 左右此时启动发动机, 进入行车充电模式。在 SOC 到达 0.7 左右时关闭

发动机。逻辑门限控制模式发动机工作时间为 2 835 s, 在发动机起停优化控制策略下发动机工作时间为 1 725 s, 相比于逻辑门限控制策略减少了 39.5%; 而在基于 EHCS 预热的发动机控制策略下发动机工作时间为 1 743 s, 相比于逻辑门限控制策略减少了 38.5%。

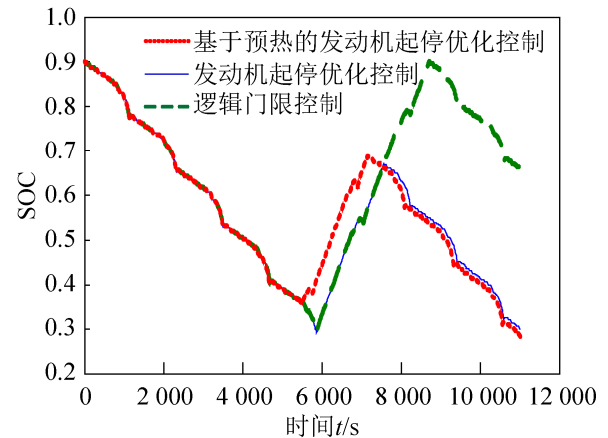


图 6 不同控制策略下 SOC 值随时间变化

Fig. 6 SOC value changes with time under different control strategies

5.3 EHCS 不同加热策略对排放的影响

图 7~8 为采用不同 EHCS 加热方式下, HC 与 CO 排放率随时间的变化。可以看出, 采用预热控制策略下发动机相比于未加热与后加热提前 286 s, 且在发动机启动之前蜂窝层温度就达到起燃温度, 所以在发动机启动后排放量接近于最小排放量。

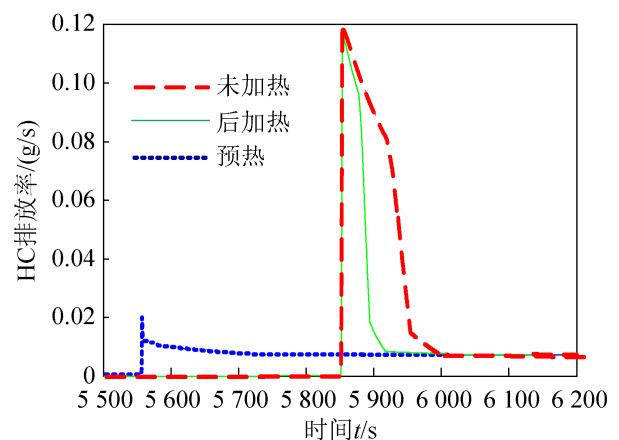


图 7 不同控制策略下 HC 排放率随时间变化

Fig. 7 HC emission rate varies with time under different control strategies

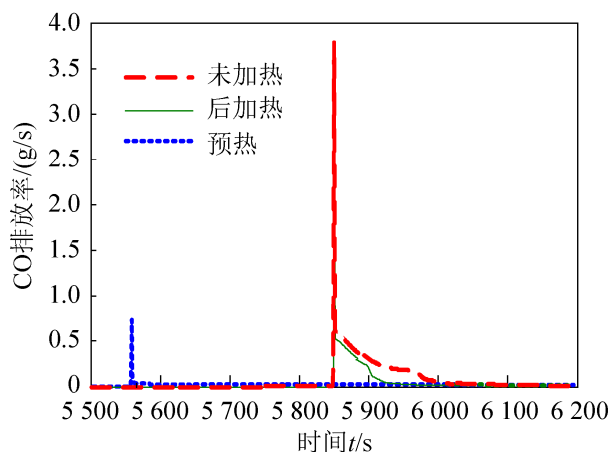


图 8 不同控制策略下 CO 排放率随时间变化

Fig. 8 CO emission rate varies with time under different control strategies

从表 4 可以看出, 对比 4 种不同的结果, 采用

表 4 EHCS 加热策略等效油耗与排放量对比

Tab. 4 Comparison of EHCS heating strategy equivalent fuel consumption and emissions

车辆控制策略	EHCS 加热方式	等效油耗/L	催化剂出口排放量/g	
			HC	CO
逻辑门限	未加热	0	13.17	50.99
发动机起停优化	未加热	0	9.68	39.72
发动机起停优化	后加热	0.012	8.18	29.14
发动机起停优化	预热	0.022	5.98	18.66

6 结论

(1) 分析了 EHCS 的工作原理, 以传热学为根据, 建立了适用于插电式串联混合动力汽车的 EHCS 动力学模型。在此基础上提出了基于 EHCS 预热的发动机起停优化控制策略。并分析了采用该控制策略时与采用发动机起停优化控制策略下的 EHCS 后加热与未加热时排放量对比。

(2) 采用 2 kW 预热 150 s 能将 EHCS 预热温度稳定维持在起燃温度以上; 相比于逻辑门限控制策略, 发动机运行时间减少了 38.5%; 相比于发动机起停优化控制策略发动机运行时间增加了 1%。

(3) 结果表明, 采用 EHCS 预热的发动机起停优化控制策略能以微小的油耗为代价, 大大降低冷启动阶段的 HC/CO 排放量, 从而减小整个工况的排放量。采用 2 kW 预热 150 s 的发动机起停优化

发动机起停优化控制策略相比于采用逻辑门限控制策略的 HC 排放量减少了 26.5%; CO 排放量减少了 22.1%。在采用发动机起停优化控制策略中, EHCS 后加热模式相比于未加热模式, HC 排放量减少了 15.5%; CO 排放量减少了 26.6%; 等效油耗为 0.012 L。采用 EHCS 预热模式相比于未加热模式, HC 排放量减少了 38.2%; CO 排放量减少了 53.0%; 等效燃油消耗率为 0.022 L。

综合上述结果可以得出结论: 采用 EHCS 预热的发动机起停优化控制策略能减小冷启动时排放, 从而使整个循环工况的排放量最小, 同时消耗了 0.022 L 的等效油耗。

控制策略对比只采用发动机起停优化控制策略能减少 HC 排放量 38.2%; 减少 CO 排放量 53.0%; 等效油耗为 0.022 L。

参考文献:

- [1] Carter R N, Menacherry P, Pfefferle W C, et al. Laboratory Evaluation of Ultra-short Metal Monolith Catalyst[J]. SAE Technical Papers (S0148-7191), 1998, 44(3): 36-43
- [2] Twigg M V. Vehicle Emissions Control Technologies[J]. Platinum Metals Review (S0032-1400), 2003, 47(1): 15-19.
- [3] Heck R M, Farrauto R J. Automobile exhaust catalysts[J]. Applied Catalysis A General (S0926-860X), 2001, 221(1/2): 443-457.
- [4] 魏寒冰, 秦大同, 陈淑江, 等. 加快三元催化器起燃的 HEV 混合驱动控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 626-631.
Wei Hanbing, Qin Datong, Chen Shujiang, et al. Control strategy of increasing three-way catalytic converter

- light-off for hybrid electric vehicle in combination driving cycle[J]. Journal of Jiangsu University (Nature Science Edition), 2012, 33(6): 626-631.
- [5] Kum D, Peng H, Bucknor N K. Optimal Energy and Catalyst Temperature Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Minimum Fuel Consumption and Tail-Pipe Emissions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2013, 21(1): 14-26.
- [6] 李峰. 插电式混合动力汽车热管理系统开发及其控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Li Feng. Research on Thermal Management System and It's Control Algorithm for Plug-in Hybrid Electric Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [7] 曾育平. 计及温度效应的插电式混合动力汽车实时优化控制策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Zeng Yuping. Integrated Temperature Effect and Real time Energy Management Strategy of Plug-in Hybrid Electric Vehicle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [8] 隗寒冰, 秦大同, 彭志远, 等. HEV 电加热能量对三元催化器转化效率、油耗和排放的影响[J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2533-2538.
Wei Hanbin, Qin Datong, Peng Zhiyuan, et al. Impact Analysis of Heated Energy in HEV for Three Way Catalyst's Efficiency, Fuel Consumption and Emission[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2533-2538.
- [9] Ramanathan K, Oh S H, Bissett E J. Electrically Heated Catalysts for Hybrid Applications: Mathematical Modeling and Analysis[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research (S0888-5885), 2011, 50(14): 317-324.
- [10] Nallusamy S. Use of Electrically Heated Metal Catalytic Converter in Cold Starting to Reduce Automotive Emissions[J]. Science Technology & Arts Research Journal (S2305-3327), 2013, 2(3): 147-152.
- [11] 李献菁, 孙永正, 邓俊, 等. 插电式串联混合动力汽车发动机起停控制策略的优化[J]. 汽车工程, 2011, 33(2): 112-117.
Li Xianjing, Sun Yongzheng, Deng Jun, et al. Optimization of Control Strategy for Engine Start-stop in a Plug-in Series Hybrid Electric Vehicle[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(2): 112-117.
- [12] Ning J, Yan F. Temperature Control of Electrically Heated Catalyst for Cold-start Emission Improvement[C]// Ifac International Symposium on Advances in Automotive Control, 2016: 189-197
- [13] Pozniak D J. The Exhaust Emission and Fuel Consumption Characteristics of an Engine during Warm up-A Vehicle Study[J]. Fuel Air Mixtures (S0148-7191), 1980, 32(2): 155-164.