

HEV 电加热能量对三元催化器转化效率、 油耗和排放的影响

隗寒冰^{1,2} 秦大同¹ 彭志远³ 陈淑江¹

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆,400044

2. 重庆交通大学,重庆,400074 3. 长安福特汽车有限公司,重庆,401122

摘要:对混合动力汽车电加热型三元催化器冷起动阶段的催化过程进行了分析,建立了适用于开发整车控制策略的三元催化器动力学模型。在此基础之上,通过对混合动力汽车运行工况的模拟,对影响三元催化器起燃的加热功率和位置等因素进行了研究,分析了电加热能量对电池荷电状态、整车油耗和排放的影响。结果表明,混合动力汽车采用电加热方式不会造成电池过放电,能以微小的燃油消耗为代价,有效加快三元催化器起燃,提高冷起动阶段的 HC/CO 转化效率。

关键词:混合动力汽车;三元催化器;电加热;起燃时间;冷起动

中图分类号:TH132

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.18.024

Impact Analysis of Heated Energy in HEV for Three Way Catalyst's Efficiency, Fuel Consumption and Emission

Wei Hanbing^{1,2} Qin Datong¹ Peng Zhiyuan³ Chen Shujiang¹

1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074

3. Chang'an Ford Automobile Co., Ltd., Chongqing, 401122

Abstract: The catalytic mechanism of electrically heated three way catalyst converter for HEV was analyzed and the control-oriented dynamic model of catalyst converter was created. Then, the operation of the vehicle was simulated. Some factors which can affect the catalytic converter's light-off time, such as electrically heated power capacity and location, were investigated systematically. The simulation was accomplished in NEDC (new European driving cycle). Effects of electrically heated energy for the battery's state of charge, the vehicle's fuel consumption and emissions were analyzed. Simulation results show that electrically heated source equipped in HEV can increase the light-off of catalytic converters effectively with tiny price of fuel consumption, improve the HC/CO catalytic efficiency during the period of cold start and depletion of battery can be avoided.

Key words: hybrid electric vehicle (HEV); three way catalyst (TWC); electrically heated; light off; cold start

0 引言

从欧Ⅲ排放标准开始,循环工况测试已经包

含了前 40s 内车辆冷起动的废气采样,它在整个排放测试中占总排放量的 80% 左右^[1]。三元催化器(three way catalytic converter, TWC)的起燃温度在 250~350℃ 之间。依靠发动机废气加热、12V/24V 蓄电池低电压加热、优化三元催化器结构和安装位置等传统方法对降低冷起动阶段

收稿日期:2012-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305472);重庆市重大科技攻关计划资助项目(CSTC2008AA6025)

35.

[9] 龚正,王国荣. 汽车轻量化的现状与趋势[J]. 环球漫游—汽车维修,1998(2):42-43.

Gong Zheng, Wang Guorong. Status and Trends in Automotive Lightweight[J]. Global Roaming—Auto Repair,1998(2):42-43.

[10] 郑晖,李国峰. 汽车用钢板的现状和发展趋势[J]. 沈阳航空工业学院学报,2006,23(2):29-31.

Zheng Hui, Li Guofeng. Present Status and Development Trend of Steel for Automobile[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2006,23(2):29-31.

[11] Rana R, Bleck W, Singh S B, et al. Development of High Strength Interstitial Free Steel by Copper Precipitation Hardening [J]. Material Letters, 2007, 61 (14/15):2919-2922. (编辑 陈 勇)

作者简介: 番 雨,男,1989 年生。武汉理工大学材料科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为材料成形新技术。 孟正华(通信作者),男,1980 年生。武汉理工大学汽车工程学院副教授,华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室合作人员。 胡建华,男,1966 年生。武汉理工大学材料科学与工程学院副教授。 冯 飞,男,1986 年生。武汉理工大学材料科学与工程学院博士研究生。 黄尚宇,男,1963 年生。武汉理工大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。

的排放效果有限^[2]。为满足日益严格的排放标准,利用混合动力电动汽车上的大容量电池和高电压设备为三元催化器提供外接热源,以加快三元催化器起燃,对进一步发挥混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)低污染的性能优势具有重要意义。

目前对混合动力汽车排放尤其是考虑三元催化器冷起动性能的研究较少,主要以实验为主,如文献[3-4]分别利用台架实验和车载排放测试系统对混合动力汽车 start/stop 阶段的排放进行了研究。单独对三元催化器的研究主要以传热学定律为依据,分析废气、催化器、外界环境之间的热量交换,在此基础上考虑废气中的催化反应产热对温度的影响,建立催化器热力学模型。如 Brandt 等^[5]用一维传热简化催化器内部的传热过程;OH 等^[6]用非稳态数学方法建立了催化器内部的气固两相热量控制方程;Kirchner 等^[7]以催化器非稳态传热模型为基础,对其直径、长度、催化剂厚度等几何参数进行了优化;Horng 等^[8]进行了电加热型三元催化器(electrically heated catalyst system, EHCS)在四冲程发动机上的冷起动实验,研究了不同加热位置、加热功率和加热时间对催化器温度、HC/CO 排放量和电加热放热量的影响;Kessels 等^[9]进行了类似研究,并比较了依靠减小点火提前角来加快催化器起燃的方法与采取电加热的方法对油耗的影响。上述研究集中在传统发动机上装备的电加热型三元催化器本身,均未涉及混合动力汽车上大功率热源对三元催化器和对整车性能(包括油耗、排放和整车控制策略)的影响。

本文在对重度混合动力汽车上装备的电加热型三元催化器冷起动阶段的氧化催化过程进行分析的基础上,提出了 EHCS 电加热能量消耗计算方法;通过建立仿真模型,对 EHCS 冷起动所消耗的蓄电池电量等效成燃油消耗进行精确计算;分别就 EHCS 电加热功率和安装位置对催化器温度、起燃时间、HC/CO 排放量、等效油耗和整车运行模式的影响进行了分析。

1 电加热三元催化器动力学模型

重度混合动力汽车上装备的电加热型三元催化器结构如图 1 所示。发动机起动后,电子控制单元(electronic control unit, ECU)依据催化器温度和电池荷电状态(state of charge, SOC)来接通三元催化器加热电流,催化器内部的电热源产生热量以提高催化器温度。催化器起燃后,断开加

热电流以降低能耗,同时防止催化器温度上升过高,避免烧结和老化。

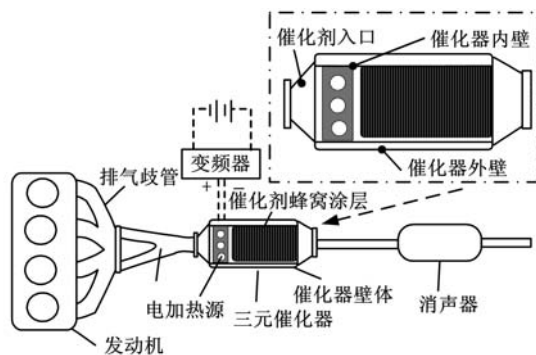


图 1 电加热三元催化器结构示意图

三元催化器冷起动阶段的转化效率与催化器温度、废气中的氧气浓度密切相关。考虑到冷起动过程中的废气主要以 HC 和 CO 为主^[10],依据文献[11-12]中提出的方法,本文将 EHCS 对废气的氧化催化过程简化为图 2。

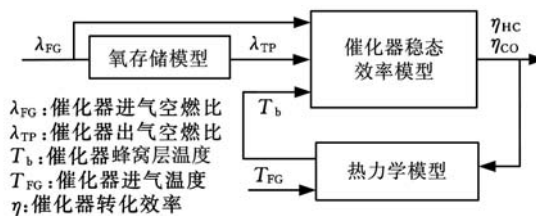


图 2 电加热三元催化器简化模型

1.1 热力学模型

建立热力学模型时假设气体为理想的不可压缩流体,气体在催化器及排气管内的流动为稳态流动;排气管中无反应发生,只有在三元催化器内部的蜂窝层催化剂才发生化学反应。三元催化器内的热力学模型可以用下式表示^[11]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q}_{cat} &= mc_{p,cat} \frac{dT_{cat}}{dt} = \dot{Q}_{gen} + \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_s &= h_s A (T_{atm} - T_{cat}) \\ \dot{Q}_{in} &= h_{in} A (T_{exh} - T_{cat}) \\ \dot{Q}_{gen} &= \frac{\dot{m}_a (1 + \frac{\varphi}{\varphi_{stoich}})}{m_{exh}} [\eta_{CO} m_{CO} \Delta Q_{CO} + \eta_{HC} m_{HC} \cdot \\ &\quad (0.86 \frac{\Delta Q_{C_3H_6}}{3} + 0.14 \Delta Q_{CH_4})] \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, \dot{Q}_{cat} 为催化器内能变化率; \dot{Q}_{in} 为废气进入催化器带来的热量变化率; \dot{Q}_s 为催化器与外界环境传热变化率; \dot{Q}_{gen} 为废气化学反应产热变化率,主要为 HC 和 CO 催化转化成 CO_2 和 H_2O 产生的热量; $\Delta Q_{C_3H_6}$ 为 HC 中丙烯催化产热; ΔQ_{CH_4} 为 HC 中甲烷催化产热; ΔQ_{CO} 为 CO 催化产热; $c_{p,cat}$ 为质量定压热容; h_s 、 h_{in} 分别为外界与催化器壁之间、废气与催化器蜂窝层之间的对流换热系数; T_{exh} 为发动机排出的废气温度; T_{cat} 为三元催化器蜂窝层温

度; T_{amb} 为环境温度; \bar{m}_{exh} 为废气平均分子质量; φ 为实际空燃比; φ_{stoich} 为理想空燃比; A 为蜂窝层表面面积; m_{CO} 、 m_{HC} 分别为废气中 CO、HC 的分子质量; \dot{m}_a 为废气质量流量; η_{HC} 为三元催化 HC 转化效率; η_{CO} 为三元催化 CO 转化效率。

i 为蓄电池向催化器通电电流, 其计算式为

$$i = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4(R_{int} + R_t)M_m\omega_m\eta_e \operatorname{sgn}(T_m')}}{2(R_{int} + R_t)} \quad (2)$$

式中, U_{oc} 为蓄电池开路电压; R_{int} 为蓄电池内阻; R_t 为电动机电阻; M_m 为电动机转矩; ω_m 为电动机角速度; η_e 为蓄电池充放电效率。

反应过程主要考虑 HC、CO 的氧化催化反应, HC 的主要成份为 C_3H_6 和 CH_4 。

1.2 氧存储模型

发动机排出废气中的氧气浓度较高时, 氧分子被吸附在催化剂表面; 废气氧气浓度较低时, 残留在催化器内的氧被释放, 稀释部分混合气。氧气存储、释放过程可以用下式表示^[5]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \begin{cases} 0.21 \frac{1}{V v_{MAF}} \rho(\lambda_{FG}, \theta) v_{MAF} (1 - \frac{1}{\lambda_{FG}}) & 0 < \theta < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ 为催化器中氧气质量变化率; v_{FG} 为流入三元催化器的废气速率; v_{MAF} 为流入三元催化器的空气速率; V 为三元催化器有效容积, 表现为涂覆在蜂窝层表面的催化剂质量; ρ 为催化器和流经的废气之间的氧气交换率。

1.3 三元催化器转化效率

受实验条件限制, 三元催化器转化效率在有限个实验数据的基础上, 由下式进行简化计算:

$$\eta = 1 - \exp\left[-a \left(\frac{T_{cat} - T_0}{\Delta T}\right)^{m_1}\right] \quad (4)$$

式中, T_0 为催化器起燃温度; m_1 、 a 为常数。

2 混合动力汽车整车运行模式

采用动力电池对三元催化器进行电加热, 需要消耗蓄电池能量, 可能会对整车工作模式和性能造成影响, 甚至造成电池过度放电, 降低蓄电池使用寿命。因此, 需要研究混合动力汽车在行驶工况下电加热能量大小及其对整车性能的影响。

本文研究对象为某双离合器重度混合动力汽车, 主要由发动机、变速器、ISG 电机、湿式多片离合器、单向离合器和换挡离合器组成, 其结构如图 3 所示。

整车控制器控制湿式多片离合器的分离与结合。单向离合器保证发动机起动后电机转速不会低于发动机转速, 即满足湿式多片离合器两端没有转速差的要求, 不会造成离合器的过度滑摩。

该混合动力汽车具有混合驱动工况、纯电动

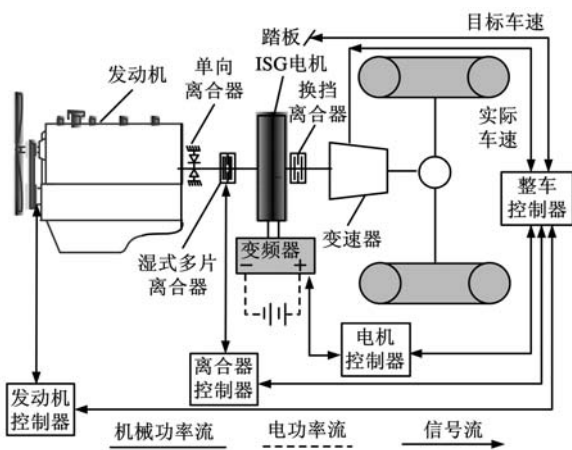


图 3 双离合器重度混合动力总成整体结构

工况和发动机单独驱动工况等。参照文献[13], 获得了新欧洲循环工况(NEDC)下该混合动力汽车的整车运行模式和换挡规律, 主要结果如图 4 所示, 图中工作模式编号 1~5 分别代表制动/停机时发动机关闭、电动机单独驱动、发动机单独驱动、混合驱动、行车充电。车速、挡位随时间的变化关系如图 5 所示, 从而为运行工况下的电加热能耗仿真计算奠定了基础。

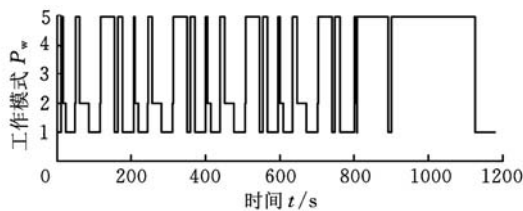


图 4 NEDC 工况下的整车运行模式

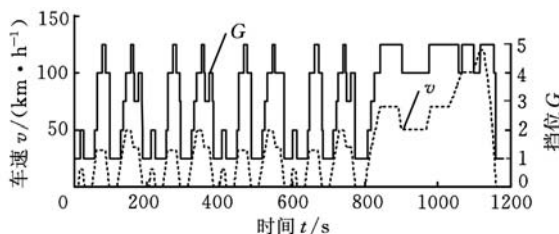


图 5 NEDC 工况下车速、挡位随时间变化曲线

3 三元催化器电加热控制策略

本文采用的三元催化器加热控制方式为: 发动机起动后, ECU 检测三元催化器内催化剂蜂窝层的温度和蓄电池 SOC 值, 以此作为判断 EHCS 是否达到起燃温度的依据。如 EHCS 为冷起动且蓄电池 SOC 值较高, 则接通电加热热源, 依靠蓄电池给催化器加热; 如蓄电池 SOC 值较低, 则切换到行车充电模式。若催化器为热起动, 则关闭加热电源。具体控制策略如图 6 所示。图 6 中, T_{st} 表示三元催化器起燃温度。

结合前文对三元催化器氧化催化过程的分

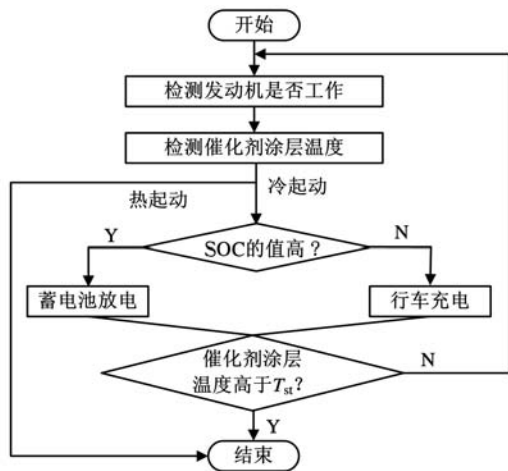


图 6 三元催化器电加热控制策略

析,可以确定冷起动时 EHCS 电加热所消耗的能量。考虑发动机效率、电动机效率和蓄电池的充放电效率,将催化器加热消耗的能量折算为燃油消耗量,折算公式为

$$g_e = \frac{Q_H}{h_u \eta_e \eta_m \eta_{dis} \eta_{ch}} \quad (5)$$

式中, h_u 为燃油低热值; η_e 为发动机工作效率,是发动机转速、转矩的函数; η_m 为电动机发电时的工作效率,是电动机转速、转矩的函数; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为蓄电池充放电效率,均是电池 SOC 和电流的函数。

4 仿真结果分析

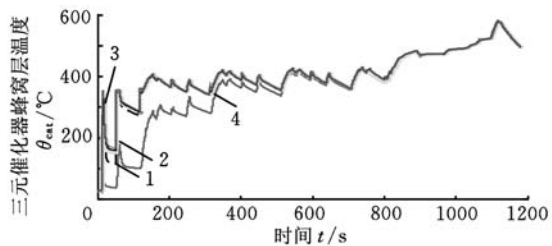
本文以 MATLAB/Simulink 仿真软件为开发环境,建立了混合动力汽车用三元催化器电加热过程的数学模型。在 NEDC 工况下,对三元催化器电加热所消耗的能量进行计算,分析了加热位置、加热功率大小对三元催化器出口的排放以及整车运行模式的影响。仿真主要参数见表 1。

表 1 仿真主要参数

催化剂质量定压热容(J/(kg·K))	460
催化剂(蜂窝层)质量(kg)	0.54
催化器管壁质量(kg)	0.65
催化剂与管壁热辐射率	0.11
催化剂(蜂窝层)接触面积(m ²)	2.45
催化器进气管表面积(m ²)	0.0318

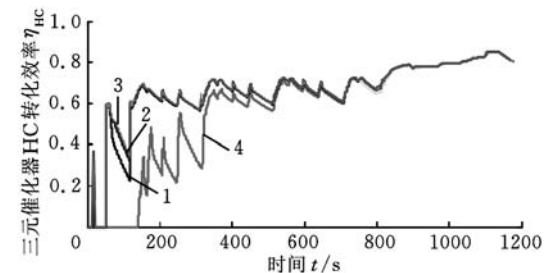
4.1 三元催化器不同加热功率时的仿真结果

图 7~图 9 所示为采用不同功率的热源对三元催化器进行加热时,催化器蜂窝层温度和催化器转化效率随时间变化的仿真结果。可以看出,采用电加热型三元催化器能够有效缩短催化器的起燃时间。相对于未采用电加热,采用 1kW、1.5kW、2kW 和 3kW 热源能够分别缩短催化器



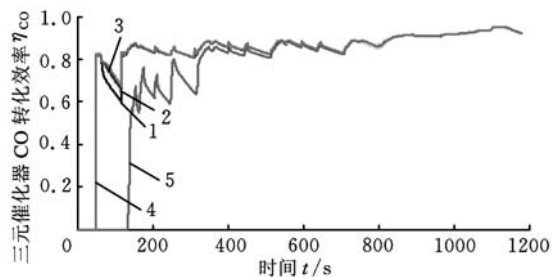
1. P=1kW 2. P=2kW 3. P=3kW 4. 无加热

图 7 加热功率对催化器蜂窝层温度的影响



1. P=1kW 2. P=2kW 3. P=3kW 4. 无加热

图 8 加热功率对催化器 HC 转化效率的影响



1. P=1kW 2. P=1.5kW 3. P=2kW

4. P=3kW 5. 无加热

图 9 加热功率对催化器 CO 转化效率的影响

起燃时间 204.76s、205.82s、206.15s 和 206.66s。

从表 2 可以看出,采用 1kW、1.5kW、2kW 和 3kW 热源加热所消耗的电折算成等效油耗分别为 0.0093L、0.012L、0.021L、0.029L;相应地,与未采取电加热方式相比,催化器出口 HC 排放分别降低 17.21%、17.46%、17.51%、17.68%;CO 排放分别降低 35.63%、36.89%、36.95% 和 37.25%。

表 2 三元催化器加热功率对整车性能影响

功率(kW)	等效油耗(L)	催化器入口排放量(g)		催化器出口排放量(g)	
		HC	CO	HC	CO
		8.26	82.49	2.33	15.13
1.0	0.0093	8.22	81.87	1.93	9.74
1.5	0.012	8.23	81.94	1.92	9.56
2.0	0.021	8.25	82.42	1.92	9.54
3.0	0.029	8.26	82.42	1.92	9.49

4.2 三元催化器加热位置不同时的仿真结果

图 10~图 12 所示分别为对三元催化器蜂窝

层、内壁、外壁和入口进行 1kW 加热时,催化器蜂窝层温度和催化器转化效率随时间变化的仿真结果。可以看出,热源的安装位置对催化器温度、起燃时间和转化效率影响显著。热源安装在蜂窝层时,催化器达到起燃温度的时间最短;安装在催化器外壁时达到起燃温度的时间最长。上述 4 种安装方式对应的起燃时间分别缩短 204.76s、202.65s、161s 和 158.7s。

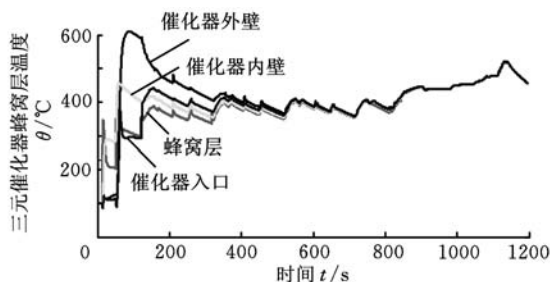


图 10 加热位置对催化剂蜂窝层温度的影响

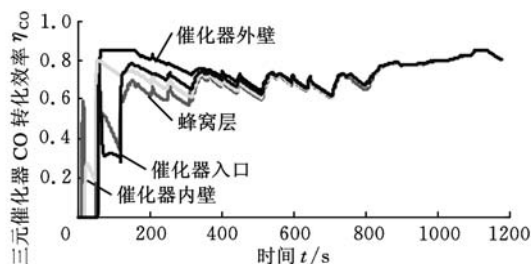


图 11 加热位置对催化器 HC 转化效率的影响

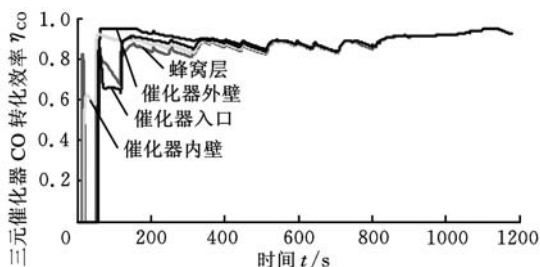


图 12 加热位置对催化器 CO 转化效率的影响

从表 3 可以看出,热源位置在催化器内壁、蜂窝层、催化器外壁、催化器入口处对应的等效油耗分别为 0.011L、0.0093L、0.026L 和 0.019L;对应的整个 NEDC 工况下的三元催化器 HC 平均转化效率分别为 77.57%、76.52%、78.2% 和 77.6%, CO 平均转化效率分别为 89.3%、88.09%、89.32% 和 88.55%。相对于未采用电加热方式,HC 平均转化效率最多提高 6.41%, CO 平均转化效率最多提高 7.67%。

综合以上计算结果可以得出结论:使催化器的转化效率最高的加热方式是在催化器外壁进行加热;在蜂窝层进行加热虽然能使三元催化器的

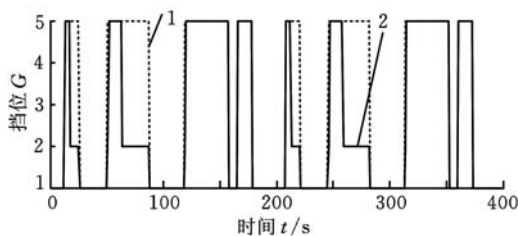
起燃时间最短,但 HC/CO 平均转化效率都是最低的,加热效果最差。这是由于在外壁加热时,催化器吸收的热量最多,催化器蜂窝层达到的温度最高。该结果与文献[8]中的实验结论一致。

表 3 三元催化器加热位置对整车性能影响

加热位置	等效油耗 (L)	催化器入口排放量(g)		催化器出口排放量(g)	
		HC	CO	HC	CO
内壁	0.0110	8.26	82.47	1.852	8.82
蜂窝层	0.0093	8.22	81.87	1.930	9.74
外壁	0.0260	8.26	82.42	1.800	8.80
入口	0.0190	8.26	82.44	1.850	9.44

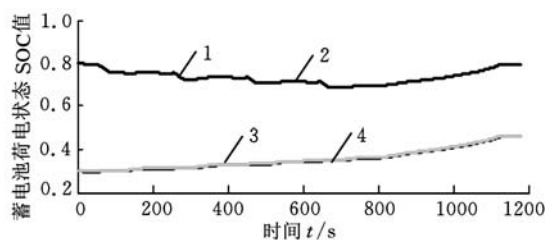
4.3 三元催化器加热对整车运行的影响

图 13 所示为三元催化器采用电加热方式对整车工作模式的影响。与图 4 对比可见,只有当 SOC 值处于阈值下限时,电加热才会对整车运行造成影响,此时整车由纯电动驱动工况转为行车充电工况运行;而当 SOC 值较高时,工作模式与无加热时的运行状况一致。



1. SOC 值为 0.3 2. SOC 值为 0.8

图 13 加热情况下 SOC 对工作模式的影响



1. SOC 值为 0.8, 加热
2. SOC 值为 0.8, 不加热
3. SOC 值为 0.3, 加热
4. SOC 值为 0.3, 不加热

图 14 不同初值时电加热对 SOC 的影响

图 14 所示为电加热对蓄电池荷电状态的影响。可以看出,电加热功率对电池 SOC 值影响程度较小。采用最大 3kW 热源进行加热,其加热时间较短,SOC 值减小不超过 0.05。

5 结论

(1)本文分析了电加热三元催化器的工作原理,以传热学原理为依据,建立了适用于开发整车

控制策略的三元催化器动力学模型。在此基础上建立了整车动力学模型,提出了三元催化器等效油耗的计算方法。对 NEDC 下冷起动阶段的三元催化器电加热能量消耗进行了仿真计算,分析了加热功率和位置等因素对催化器效率及整车性能的影响。

(2)结果表明,采用电加热型三元催化器能够以微小的油耗为代价,有效缩短催化器起燃时间,降低冷起动阶段的 HC/CO 排放。采用 1kW 加热的等效油耗仅为 0.026L,能够缩短催化器起燃时间 204.76s,HC/CO 的平均转化效率分别提高 6.41%和 7.67%。

(3)热源功率和位置对三元催化器的起燃影响显著:增大热源功率能够有效缩短催化器起燃时间;对催化器外壁加热时催化器达到起燃温度的时间最长,但催化器的平均转化效率最高。电加热催化器对整车控制策略本身影响较小,不会造成电池过放电。

参考文献:

[1] 周毅,刘新宇,高卫民.三元催化器冷起动研究分析[J].内燃机工程,2002,23(3):43-49.
Zhou Yi, Liu Xinyu, Gao Weimin. Experimental Research on Performance of Three-way Catalytic Converter in Engine Cold Start Phase[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2002, 23(3):43-49.

[2] Collins N R, Twigg V. Three-way Catalyst Emissions Control Technologies for Spark-ignition Engines—recent Trends and Future Developments[J]. Topics in Catalysis, 2007, 42/43(1/4): 323-332.

[3] 梁海波,高卫民,朱军,等.混合动力 Start/Stop 控制策略对整车排放影响的研究[J].内燃机工程,2008,29(2):15-18.
Liang Haibo, Gao Weimin, Zhu Jun, et al. Study on Influence of Start/Stop Control Strategy of HEV on Vehicle Emission[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2008, 29(2):15-18.

[4] Yu S, Dong G, Li L. Transient Characteristics of Emissions During Engine Start/Stop Operation Employing a Conventional Gasoline Engine for HEV Application[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(5):543-549.

[5] Brandt E P, Wang Yanying, Grizzle J W. Dynamic Modeling of a Three-way Catalyst for SI Engine Exhausts Emission Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(5): 767-776.

[6] OH S H, Bissett E J. Mathematical Modeling of Electrically Heated Monolith Converters: Analysis of Design Aspects and Heating Strategy[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1994, 33(12):3086-3093.

[7] Kirchner T, Eigenberger G. Optimization of the Cold-start Behavior of Automotive Catalysts Using an Electrically Heated Pre-catalyst[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(10): 2409-2418.

[8] Horng R F. Effect of Input Energy on the Emission of a Motorcycle Engine with an Electrically Heated Catalyst in Cold-start Conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24 (14/15): 2017-2028.

[9] Kessels J T B A, Foster D L, Bleuanus W A J. Fuel Penalty Comparison for (Electrically) Heated Catalyst Technology[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2010, 65(1): 47-54.

[10] Pozniak D J. The Exhaust Emission and Fuel Consumption Characteristics of an Engine During Warmup: a Vehicle Study[C]//Society of Automotive Engineers. Warrendale, 1980:800396.

[11] Shaw B T. Modeling and Control of Automotive Coldstart Hydrocarbon Emissions: a Dissertation for Doctor of Philosophy[D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2002.

[12] Chan S H, Hoang D L, Zhou P L. Heat Transfer and Chemical Kinetics in the Exhaust System of a Cold-start Engine Fitted with a Three-way Catalytic Converter[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2000, 214(7):765-777.

[13] 叶明,秦大同,刘振军.轻度混合动力 AMT 系统经济性换挡规律优化[J].系统仿真学报,2008, 20(11):3012-3015.
Ye Ming, Qin Datong, Liu Zhenjun. Optimization of Economy Shift Rule for Mild Hybrid Electric System Equipped with Automatic Manual Transmission[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(11):3012-3015.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 陈来冰,男,1979年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生,重庆交通大学机电与汽车工程学院讲师。主要研究方向为车辆动力传动及其控制、混合动力汽车。发表论文 10 篇。秦大同,男,1956年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师。彭志远,男,1981年生。长安福特汽车有限公司工程师、博士。陈淑江,男,1985年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。