

考虑发动机排气背压阈值的柴电混合动力汽车最优控制

隗寒冰^{1†}, 刘小飞¹, 彭志远²

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆长安汽车有限公司 汽车工程研究院, 重庆 401120)

摘要: 根据柴油发动机台架试验结果, 分析排气背压对发动机性能的影响, 在设计插电式柴电混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)控制策略时考虑排气背压对油耗与排放的影响因素. 以排气背压和蓄电池荷电状态为状态变量, 利用庞特里亚金极小值原理, 求解以插电式混合动力汽车油耗与颗粒物排放量的多目标泛函, 从而得到整车油耗与排放综合最优控制策略. 在MATLAB/Simulink仿真平台下建立了包含柴油颗粒过滤器(diesel particle filter, DPF)压力损失和捕集效率模型的整车动力学模型, 对上述所得最优控制策略进行验证, 并与二阶段(charge-depleting and charge-sustaining, CD-CS)控制策略和无排气背压状态最优控制策略进行对比. 仿真结果表明, 本文建立的最优控制策略相对于其它两种控制策略均能明显降低排气背压升高对发动机性能的影响, 有效地改善了整车燃油经济性和排放性. 最后通过台架试验对所提出的最优控制策略的有效性进行验证, 结果表明, 采用该控制策略优化后的等效燃油消耗量与颗粒物(particulate matter, PM)排放量分别降低了9.68%和32%.

关键词: 混合动力汽车; 柴油发动机; 排气背压; 极小值原理; 最优控制; 排放

中图分类号: TP273 文献标识码: A

The optimal control of plug-in diesel hybrid electric vehicle with considering the threshold of exhaust back pressure

WEI Han-bing^{1†}, LIU Xiao-fei¹, PENG Zhi-yuan²

(1. College of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Automobile Engineering Institute, Chongqing Changan Automobile Company, Chongqing 401120, China)

Abstract: The influence of exhaust back pressure for the engine performances is analyzed according to the experiment results from diesel engine test rig. In order to obtain the comprehensive optimization of the fuel and emission of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), this paper pays attention to the effects of exhaust back pressure on fuel economy and emission in the design of the PHEV control strategy. Then multi-objective cost function relating to the exhaust back pressure and the battery's state of charge have been establish and solved by Pontryagin's Minimum Principle. In order to validate the effectiveness of the control strategy we proposed, the vehicle dynamic model including the pressure drop model and collection efficiency model of diesel particle filter (DPF) has been established in the MATLAB/Simulink platform. Other three control strategies, the charge-depleting and charge-sustaining (CD-CS), single PMP (S-PMP) and double PMP (D-PMP) control strategies are implemented for comparison at the same time. Simulation results show that the optimal control strategy proposed in the paper significantly eliminate the effect of increasing exhaust back pressure on the engine performance. The fuel economy and emission performance has been improved effectively. In order to further verify the effective of the proposed optimal control strategy, the bench tests experiment are conducted. The results show that the equivalent fuel consumption and PM emission is reduced by 15.28% and 34.25% respectively.

Key words: hybrid electric vehicle; diesel engine; exhaust back pressure; pontryagin's minimum principle; optimal control; emission

1 引言(Introduction)

柴油发动机具有清洁、高效以及动力性好等优点, 在工程机械和商用车领域都已经得到广泛应用, 可以认为车辆动力柴油化将是未来汽车技术的

重要发展方向之一^[1]. 柴油发动机在瞬态工况下涡轮增压器响应滞后, 进气量不足致使无法及时适应供油量变化, 引起空燃比减小, 导致发动机排放性能下降. 尤其是颗粒物浓度(particulate matter, PM)上升,

收稿日期: 2016-06-22; 录用日期: 2017-03-02.

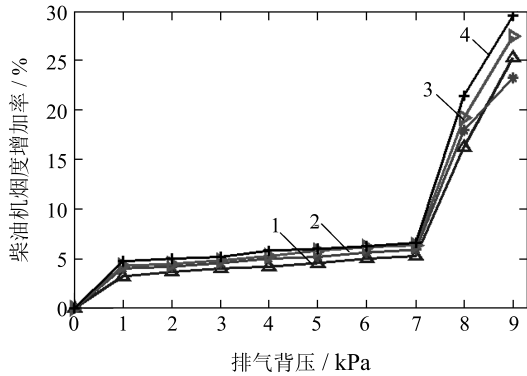
[†]通信作者. E-mail: hbwei@cqjtu.edu.cn; Tel.: +86 15823232974.

本文责任编辑: 邓飞其.

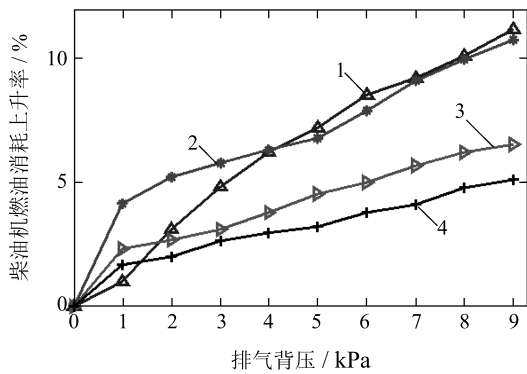
国家自然科学基金项目(51305472), 重庆市基础科学与前沿技术研究专项(cstc2014jcyjA60005)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (51305472) and National Natural Science Foundation of Chongqing Municipal (cstc2014jcyjA60005).

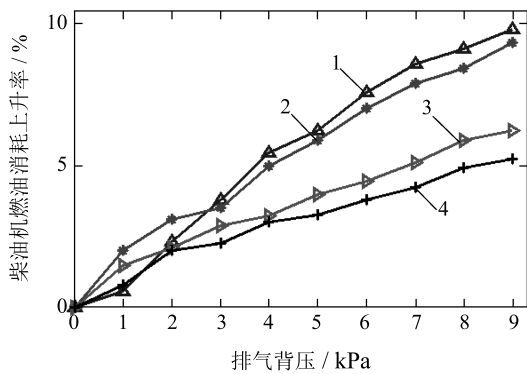
内、发动机大负荷工作, 功率下降在4.2%以内, 油耗上升在4.1%以下; 而小负荷工作时波动较为剧烈, 功率下降8.5%左右, 油耗上升达9.2%左右。



(a) 排气背压对柴油机烟度的影响



(b) 排气背压对柴油机燃油消耗的影响



(c) 排气背压对柴油机燃油功率的影响

1: 负荷35% 2: 负荷50% 3: 负荷75% 4: 负荷100%

图2 排气背压对柴油机性能影响

Fig. 2 Influence of exhaust back pressure for diesel engine performance

由上述结果可以认为, 排气背压上升均会不同程度地引起柴油机烟度上升, 且会造成输出转矩稍微降低和排气过程的阻力功率增大, 致使其输出功率降低, 油耗增加. 特别是排气背压在7 kPa之前时, DPF捕集正常, 烟度排放良好; 而当超过7 kPa时, DPF捕集异常, 烟度排放恶化。

3 主要部件数学模型(Mathematical model of main components)

3.1 整车动力总成结构(Powertrain structure of vehicle)

本文以双离合器式单轴并联结构的插电式柴油混合动力汽车为研究对象, 整车动力总成结构如图1所示, 动力系统包括柴油机、ISG电机、变速器、电池组、湿式离合器C1和换挡离合器C2, 后处理包括氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)和DPF, 以及整车控制器(vehicle control unit, VCU)、发动机控制器(electronic control unit, ECU)、动力电池管理系统(battery management system, BMS)、变速器控制器(transmission control unit, TCU)和电机控制器等部件组成, 其主要部件性能参数如表2所示。

表2 主要部件性能参数

Table 2 Parameters of main components performance

名称	相关参数
ISG电机额定功率 P_N /kW	15
ISG电机峰值功率 P_{max} /kW	40
蓄电池额定容量 Q_{bat} /(A·h)	20
蓄电池额定电压 U_N /V	330
变速器各档位速比 i_g	3.58, 2.02, 1.35, 0.98, 0.81
主减速比 i_0	3.947

3.2 DPF压力损失模型(Pressure loss model of DPF)

微粒流在单通道结构DPF内流动和过滤如图3所示, 其进出通道具有对称性。

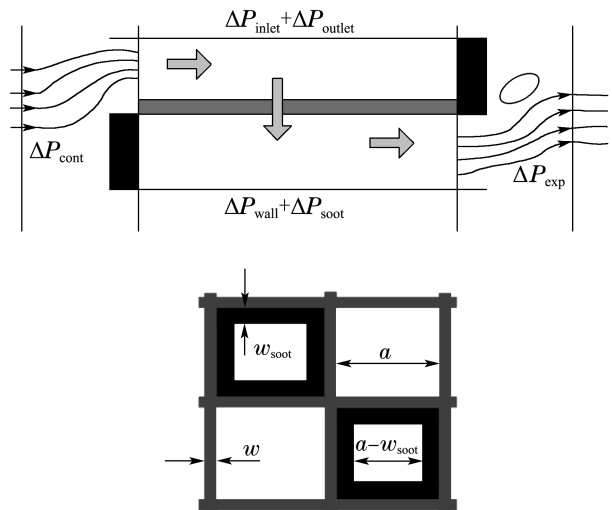


图3 DPF压力损失与单通道内部结构示意图

Fig. 3 Sketch of DPF pressure loss and internal structure of single channel

在DPF捕集过程中压力损失主要包括: 发动机排气通过过滤体壁面和微粒物层时的压力损失 ΔP_{wall} 和 ΔP_{soot} ; 进出气道内部流动摩擦引起的沿程

损失 ΔP_{inlet} 和 ΔP_{outlet} ; 进出口处流动面积变小产生的局部压力损失 ΔP_{cont} 和 ΔP_{exp} .

对于 ΔP_{wall} 和 ΔP_{soot} 的压降^[15-16], 常采用达西(Darcy)定律, 则

$$\Delta P_{\text{wall}} = \frac{\mu Q}{2V_f} (a + W)^2 \left(\frac{W}{aK_{\text{wall}}} \right), \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{soot}} = \frac{\mu}{\text{soot}} \int_0^{W_{\text{soot}}} u(x) dx = \frac{\mu Q (a + W)^2}{\pi D^2 L K_{\text{soot}}} \ln \left(\frac{a}{a - 2K_{\text{soot}}} \right), \quad (2)$$

ΔP_{inlet} , ΔP_{outlet} 为进、出气道内沿程损失, 它主要与孔道长度、入口宽度以及气流性质(密度、黏度、速度)等因素有关^[15-16].

$$\Delta P_{\text{inlet}} = \frac{\mu Q}{2V_f} (a + W)^2 \left(\frac{4L^2}{3(A - W_s)^2} \right), \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{outlet}} = \frac{\mu Q}{2V_f} (a + W)^2 \left(\frac{4L^2}{3A^2} \right). \quad (4)$$

对于进出口的局部压力损失^[15-16], 可表示为

$$\Delta P_{\text{cont}} + \Delta P_{\text{exp}} = \zeta_{\text{cont}} \frac{\rho U_2}{2} + \zeta_{\text{exp}} \frac{\rho U_2}{2} = \zeta \frac{\rho U_2}{2} = \frac{2\zeta \rho Q^2 (a + W)^4 L^2}{a^4 V_f^2}. \quad (5)$$

则排气背压可由废气流经DPF总的压力损失可表示为^[16-18]

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\text{cont}} + \Delta P_{\text{inlet}} + \Delta P_{\text{outlet}} + \\ &\Delta P_{\text{wall}} + \Delta P_{\text{soot}} + \Delta P_{\text{exp}} = \\ &A \cdot Q + B \cdot Q^2, \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$A = \frac{\mu}{2V_f} (a + W)^2 \left(\frac{W}{aK_{\text{wall}}} + \frac{1}{2K_{\text{soot}}} \times \ln \left(\frac{a}{a - 2W_{\text{soot}}} \right) + \frac{4FL^2}{3(a - W_{\text{soot}})^2} \right), \quad (7)$$

$$B = \frac{2\zeta \rho (a + W)^4 L^2}{a^4 V_f^2}. \quad (8)$$

式(6)-(8)中除排气流量为变量外, 其余参数均为常数, 式(6)表明了不同转速、负荷下排气流量与排气背压之间的数值关系.

3.3 DPF 捕集效率模型 (Collection efficiency model of DPF)

DPF蜂窝陶瓷过滤体的颗粒物捕集机理有扩散、惯性和拦截等3种. 柴油机排气颗粒物被捕集的过程中, 惯性碰撞机理与拦截机理对直径较大的颗粒物起主要作用, 扩散机理主要对较小的颗粒物起作用, 在建立DPF捕集效率模型时必须综合考虑3种机理的作用. 由经典捕集理论可知

$$E = E1 + E2 + E3 - (E1E2 +$$

$$E1E3 + E2E3), \quad (9)$$

$$\eta = 1 - \exp \left(\frac{4(1 - \varepsilon)WE}{\pi \varepsilon D_p} \right), \quad (10)$$

其中 $E1, E2, E3$ 的表达式详见参考文献[19].

3.4 蓄电池模型(Battery model)

基于蓄电池的简化内阻模型, 其电池SOC和电流 I_{bat} 分别表示为

$$\text{SOC} = -\frac{I_{\text{bat}}}{Q_{\text{bat}}}, \quad (11)$$

$$I_{\text{bat}} = \frac{U_{\text{bat}} - \sqrt{U_{\text{bat}}^2 - 4R_{\text{bat}}P_m \eta_m^{-sgn T_m}}}{2I_{\text{bat}}}. \quad (12)$$

4 基于庞特里亚金极小值原理的最优控制策略(The optimal control strategies based on Pontryagin's minimum principle)

4.1 PHEV 最优控制问题描述 (Description of PHEV optimal control problem)

依据图2的试验结果判断, 随排气背压的上升, 发动机的排放与油耗均有不同程度上升. 因而, 针对插电式柴电混合动力汽车燃油经济性与排放性综合优化控制, 排气背压需要被控制在一定的域值以内.

利用上述DPF压力损失特性和捕集效率特性所建立的DPF模型以及蓄电池模型, 建立了以循环工况下整车所消耗的油耗和PM排放量最小为优化目标的本函数. 其中, 以电动机输出功率为系统的控制变量 $u(t)$, 排气背压和SOC为系统的状态变量 $\zeta(t)$. 其目标成本函数为

$$\begin{aligned} \min J(\zeta(t), u(t), t) = \\ \int_{t_0}^{t_f} [\dot{m}_{\text{fuel}}(u(t), t) + \dot{m}_{\text{PM}}(\zeta(t), u(t), t) \cdot (1 - \eta_{\text{PM}})], \end{aligned} \quad (13)$$

式中: \dot{m}_{fuel} 与 \dot{m}_{PM} 分别表示PM排放率, 二者由发动机MAP图插值确定. 约束条件为

$$\begin{cases} P_{m,\text{min}} < P_m(t) < P_{m,\text{max}}, \\ T_{\text{eng},\text{min}} < P_{\text{eng}}(t) < P_{\text{eng},\text{max}}, \\ T_{m,\text{min}} < T_m(t) < T_{m,\text{max}}, \\ \text{SOC}_{\text{min}} < \text{SOC}(t) < \text{SOC}_{\text{max}}, \\ P_{m,\text{min}} < P_m(t) < P_{m,\text{max}}, \end{cases} \quad (14)$$

其中发动机、电动机最大/最小转矩和功率限值等均是在台架试验上获取, 反映了各动力源固有特性.

4.2 PMP极小值原理应用(Application of PMP)

PMP是最优控制理论中最重要的基础理论. 极大值原理是对古典变分法的推广, 克服了古典变分法无法对受约束泛函求极值的缺陷, 能用于处理由于外界限制而使系统的输入作用(即控制变量)有约束的问题. 本文以柴油发动机排气背压为关键状态变量之一,

以电动机输出功率为控制变量,对发动机油耗和DPF出口PM值为多目标函数进行求解.具体而言,PMP包括Hamilton函数、状态方程、控制变量、协态方程和边界条件等.

1) Hamilton目标函数.

在成本函数表达式(13)基础上,根据PMP定义建立Hamilton目标函数.

$$H(\zeta(t), u(t), t) = \dot{m}_{\text{fuel}}(u(t), t) + \dot{m}_{\text{PM}}(\zeta(t), u(t), t) \cdot (1 - \eta_{\text{PM}}) - \lambda_1(t) \frac{I_{\text{bat}}}{Q_{\text{bat}}} + \lambda_2(t) \Delta \dot{P}, \quad (15)$$

式中 $\lambda_i(t)$ 为协态变量,由式(18)计算.

2) 状态方程.

如前所述,本文研究工作的出发点是限制排气背压以降低DPF出口碳烟排放,所以建立的状态方程中除了考虑SOC之外,增加了另一个状态变量即排气背压损失,故状态方程为

$$\zeta(t) = (\text{SOC}(t), \Delta P(t))^T. \quad (16)$$

3) 控制变量.

对于PHEV能量管理问题,最优控制物理意义即是指针对一个特定NEDC循环工况,通过控制发动机和电动机两个动力源之间的功率流合理分配.任意时刻,发动机功率与电动机功率之和必然与需求功率即工况需求相等才能满足车辆动力性要求.在指定工况条件下,任意时刻的需求功率已知,而本文研究的混合动力系统属于同轴并联结构,联合驱动工作模式下发动机和电动机转速相同.因此只需要将约束控制变量设为电动机输出功率即可,而发动机功率根据 $P_{\text{eng}} = P_{\text{req}} - P_{\text{m}}$ 求得,故控制变量可取为

$$u(t) = P_{\text{m}}, u(t) \in \mathbb{R}. \quad (17)$$

4) 协态方程.

协态方程的定义为Hamilton目标函数对状态变量求偏导,分别将式(6)(11)代入式(13)并求偏导,得到的状态方程如下所示:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1(t) = -\frac{\partial H}{\partial \text{SOC}} = \frac{1}{Q_{\text{bat}}} \frac{\partial I_{\text{bat}}}{\partial \text{SOC}} \lambda_1(t), \\ \dot{\lambda}_2(t) = -\frac{\partial H}{\partial \Delta P} = -\frac{2B\dot{Q}}{A + 2BQ} \lambda_2(t). \end{cases} \quad (18)$$

由图4-5所示电池特性可知,在SOC正常工作范围内(0.3-0.9)时,无论是内阻还是开路电压均处于变化较小范围内,因此可以忽略SOC对电池内阻与电动势的影响,则进一步求解协态方程可以得出

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = \lambda_1(t_0) = \lambda_0, \\ \lambda_2(t) = \frac{1}{A + 2BQ} + c, \end{cases} \quad (19)$$

式中 c 为与循环工况有关的协态变量初值^[20].

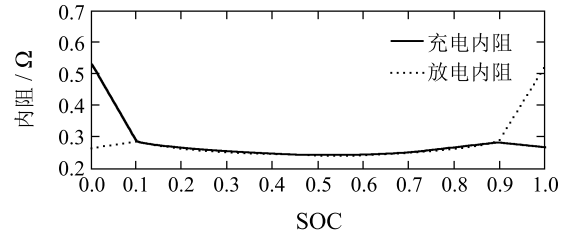


图4 电池充放电内阻随SOC变化曲线

Fig. 4 Plot of the internal resistance of the battery with SOC

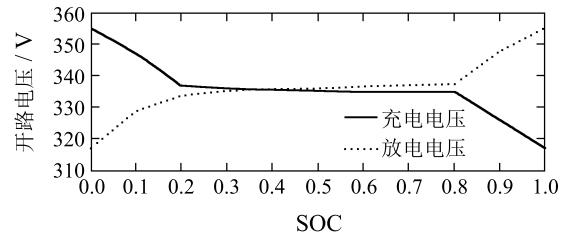


图5 充放电开路电压随SOC变化曲线

Fig. 5 Plot of the open circuit voltage of the battery with SOC

5) 边界条件.

$$\begin{cases} 0.3 < \text{SOC}(t) < 0.9, \\ 0 < \Delta P(t) < 7 \text{ kPa}. \end{cases} \quad (20)$$

为防止电池过充、过放均会对电池性能和寿命造成损害, SOC上下限值设置为0.3 ~ 0.9, 排气背压根据上述实验结果分析设置为0 ~ 7 kPa.

6) 最优条件.

在控制域内对式(15)所示的Hamilton函数取极小值即可得到最优轨迹 $\zeta^*(t)$ 和最优控制 $u^*(t)$ 量.

$$\min_{u \in \mathbb{R}} H[\zeta^*(t), \lambda_i^*, u(t), t] = H[\zeta^*(t), \lambda_i^*, u^*(t), t]. \quad (21)$$

式(21)表明求极值时Hamilton函数并不需要满足对控制变量可微条件,只需要在整个闭集区间内寻找最小值即可.而发动机油耗和PM排放与转矩、转速呈现明显的非线性关系,难以求式(21)的解析解,只能通过数值解法求出Hamilton函数的最小值.求解结果 $u^*(t)$ 的实际意义即为电动机输出功率,发动机功率由目标工况车速决定的需求功率减去 $u^*(t)$ 得到.由计算得到的发动机功率和电动机功率就可以判断此时车辆所需的工作模式,然后由混合动力整车控制器(hybrid control unit, HCU)控制离合器C1、发动机及电动机转矩转速实现工作模式切换.各个工作模式运行时对应SOC状态曲线和排气背压 $\Delta P(t)$ 曲线即为最优状态轨迹 $\zeta^*(t)$.

5 仿真分析(Analysis of simulation results)

为验证本文提出的以SOC和排气背压双状态变量的极小值原理(double-PMP, D-PMP)能量管理策略,

在MATLAB/Simulink仿真环境中建立整车动力学模型并进行求解. 为研究排气背压状态影响整车性能, 利用D-PMP控制策略所求SOC的协态变量, 求解以SOC为单状态的极小值原理能量管理策略(single-PMP, SPMP), 然后将上述两种控制策略的仿真结果与基于CD-CS控制策略^[21]的仿真结果进行对比. 为保证行驶历程足够长, 以满足在CD-CS策略工况下SOC能达到下限值的条件, 仿真时长设定为7个新欧洲(new europe driving cycle, NEDC)循环工况.

图6为NEDC循环工况下目标车速与仿真车速的对比关系, 图7为目标车速与实际车速差. 而图8为3种控制策略对应的SOC变化曲线.

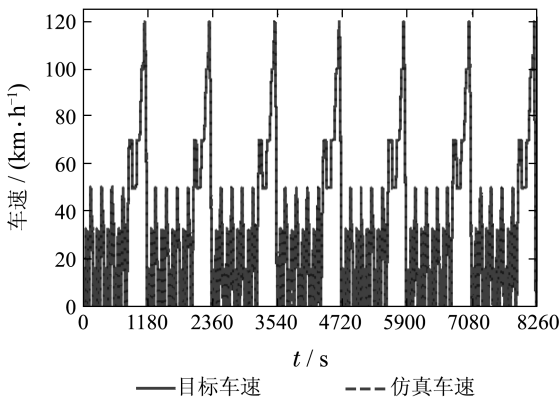


图6 NEDC循环工况车速曲线

Fig. 6 Velocity profile of NEDC cycle

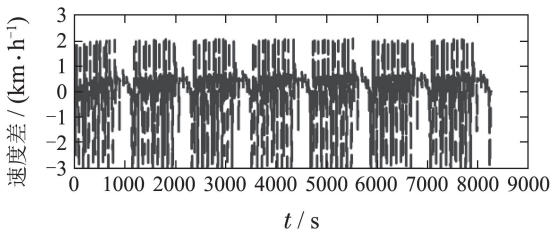


图7 目标车速与实际车速差

Fig. 7 Difference between the required and actual velocity

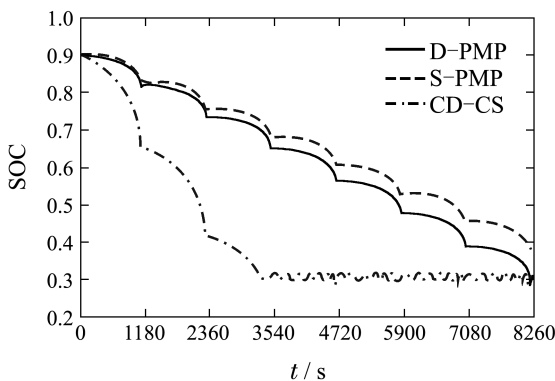


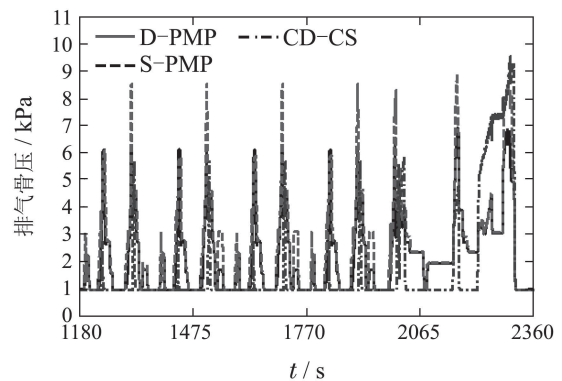
图8 3种控制策略对应的SOC变化曲线

Fig. 8 Comparison of the corresponding SOC of three control strategies

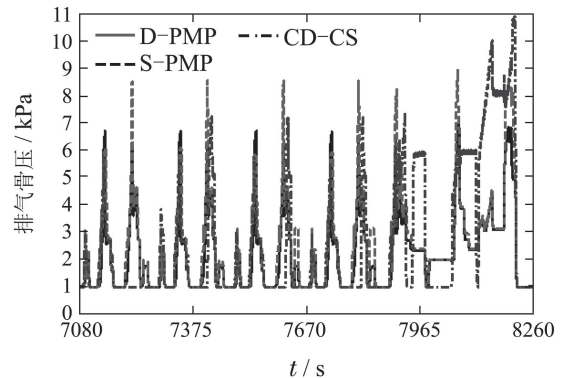
由图6和图7可知, 仿真模型计算得到的实际车速

与目标车速误差在3 km/h范围内, 模型精度较高. 由图8所示的SOC变化曲线可知, 在保证动力性的前提下, 其D-PMP和S-PMP控制策略的SOC都随行驶距离的增加而下降, 但当循环工况结束时, 二者存在一定差值, 即D-PMP控制策略消耗的电量大比S-PMP控制策略消耗的电量大. 分析其原因, 是因为D-PMP和S-PMP控制策略求解时, 二者SOC的协态变量相同, 而D-PMP控制策略由于要考虑排气背压的影响, 导致某些工况下发动机输出功率不足, 为保证整车的动力性, 电池组就承担了多余功率, 致使其SOC下降增加, 因此两种控制策略下的SOC存在差值.

图9为电量消耗模式(charge-depleting, CD)和电量保持模式(charge-sustaining, CS)排气背压变化曲线. 相对于其他两种策略, D-PMP控制策略可以通过调节电动机输出功率来间接调节发动机工作点区域, 即调整发动机扭矩和转速来调节排气流量, 从而对NEDC工况内的排气背压进行优化控制, 使其被限制在阈值7kPa以内, 以改善PM排放性能. 尤其对于大负荷工况区间, 因临近排气背压极限易引起燃烧恶化导致排放升高, 故而D-PMP控制策略能够更加有效地优化控制大负荷工况内排气背压的变化情况, 以此降低PM排放量.



(a) CD阶段排气背压变化曲线



(b) CS阶段排气背压变化曲线

图9 3种控制策略对应的排气背压变化曲线

Fig. 9 Comparison of the corresponding exhaust back pressure of three control strategies

图10-11分别为上述3种控制策略的燃油消耗曲线和

PM排放量曲线. 由图10-11可知, 在整个循环工况内, D-PMP策略的等效燃油经济性和PM排放量为3.06 L和0.0203 g/km, 而S-PMP策略为3.11 L和0.0254 g/km, CD-CS能量管理控制策略为3.49 L和0.0289 g/km. 相比上述两种能量管理控制策略, D-PMP优化策略在等效燃油经济性上分别降低了1.61%和12.32%. 在PM排放量方面分别减少了20.08%和29.76%. 其中, 整车等效燃油消耗量包括消耗的实际燃油量和消耗电能转化的燃油消耗量, 电能转化的燃油消耗量根据GBT19754-2005中提供的方法进行计算.

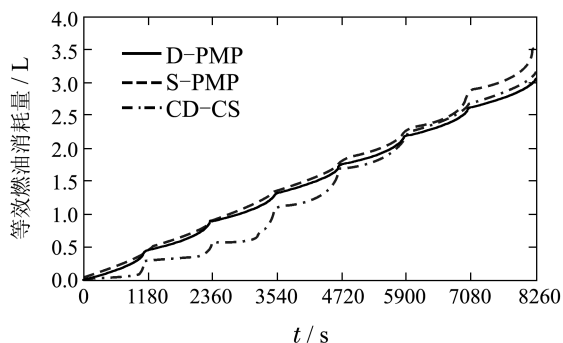


图 10 3种控制策略对应的等效燃油消耗曲线

Fig. 10 Equivalent fuel consumption curves of three control strategies

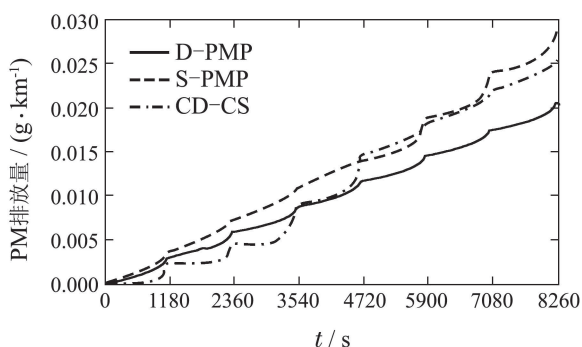


图 11 3种控制策略对应的PM 排放量曲线

Fig. 11 PM emission curves of three control strategies

6 试验验证(Analysis of test results)

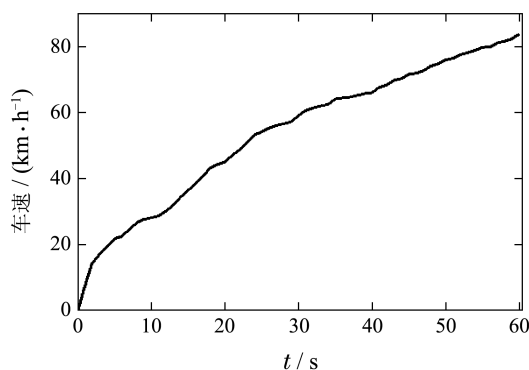
为了验证本文所建立的基于排气背压域值的能量管理策略, 以dSPACE作为整车控制器, 在柴电混合动力台架上进行了试验验证. 图11为柴电混合动力系统台架.



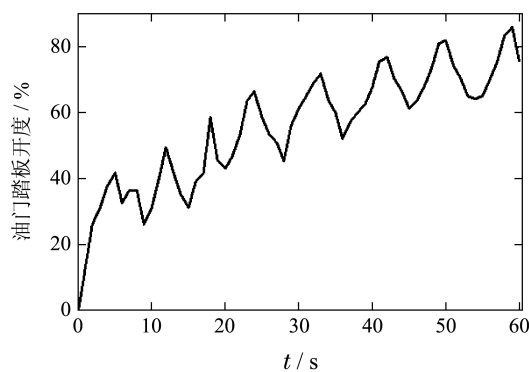
图 12 柴电混合动力系统台架

Fig. 12 Test rig of diesel-electric hybrid power system

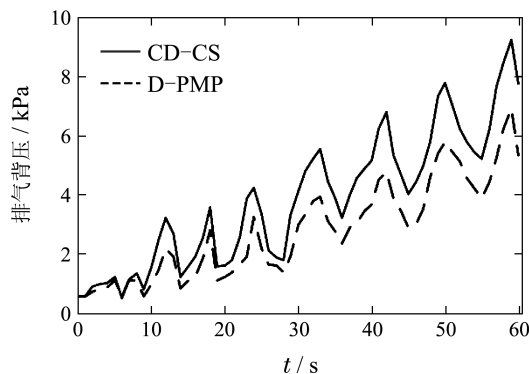
利用柴电混合动力台架分别进行了D-PMP策略和CD-CS策略的试验测试, 其试验结果如图12所示. 其中, 台架系统按照图12(a)与12(b)所示的车速、油门踏板开度进行运行, 并采用CD-CS能量管理策略对其进行控制; 然后依据D-PMP策略进行相同车速与油门踏板开度下的台架试验.



(a) 车速曲线



(b) 油门踏板开度曲线



(c) 排气背压变化曲线

图 13 柴电混合动力台架测试数据

Fig. 13 Experiment results from the test rig of diesel-electric hybrid power system

由图12可以看出, 当车速较低、油门踏板开度较小时, 优化前、后的排气背压值较小, 且相差不大. 这是由于此时排气背压较低, D-PMP策略对排气背压影响较小. 随着车速的升高, 油门踏板开度的增大, CD-CS策略对应的排气背压升高较快, 且部分大负荷下排气背压已超过了极限背压阈值7 kPa, 而D-PMP策略

对应的排气背压明显降低,其值被控制在7 kPa以内,从而有效地优化控制排气背压的变化情况,以此降低PM排放量。

为了定量地评价本文提出的插电式柴电混合动力汽车燃油经济性与排放性综合优化控制策略的有效性,依据试验结果计算出60 s时间段内的等效油耗为0.0233 L,发动机PM排放量为0.0323 g/km,相比于CD-CS控制策略等效油耗的0.0258 L与PM排放量的0.0475 g/km,等效燃油经济性提高了9.68%,PM排放量减少了32%。

7 结论(Conclusions)

1) 根据柴油发动机台架试验结果分析了排气背压对发动机性能的影响,当排气背压超过阈值7 kPa时,发动机性能均出现恶化;低于7 kPa时,其燃油经济性和排放性表现均在较低范围内。

2) 基于庞特里亚金极小值原理,建立以SOC和排气背压为状态变量的Hamilton函数,提出了插电式柴电混合动力汽车PM排放综合优化控制策略。

3) 仿真结果表明,以SOC和排气背压为双状态变量的D-PMP对整车油耗与PM改善明显。在燃油消耗量方面,相比S-PMP策略和CD-CS控制策略分别降低了1.61%和12.32%;而对于PM排放量,相比二者分别减少了20.08%和29.76%。

4) 利用柴电混合动力台架试验对本文所建立的D-PMP策略进行验证。试验结果表明,60 s时间段内相比于CD-CS控制策略,D-PMP策略可以有效的改善整车油耗与排放,其等效燃油经济性提高了9.68%,PM排放量减少了32%。

参考文献(References):

- [1] SHUAI Shijin, TANG Tao, ZHAO Yanguang, et al. State of the art and outlook of diesel emission regulations and aftertreatment technologies [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2012, 3(3): 200 – 217.
(帅石金, 唐韬, 赵彦光, 等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, 3(3): 200 – 217.)
- [2] KIM Y, SALVI A, STEFANOPOULOU A G, et al. Reducing soot emissions in a diesel series hybrid electric vehicle using a power rate constraint map [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(1): 2 – 12.
- [3] ZHAO D Z, STOBART R, DONG G Y, et al. Real-time energy management for diesel heavy duty hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(3): 829 – 841.
- [4] JIANG Dahai, NING Zhi, YAO Guangtao, et al. A study on the right moment for the regeneration of diesel particulate filter [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 32(2): 109 – 115.
(姜大海, 宁智, 姚广涛, 等. 柴油机颗粒捕集器再生时机的研究 [J]. *汽车工程*, 2012, 32(2): 109 – 15.)
- [5] MARANO V, TULPUL P, STOCKAR S, et al. Comparative study of different control strategies for plug-in hybrid electric vehicles [J]. *SAE Paper*, 2009-24-0071.
- [6] ANTONIO S, LINO G. Control of hybrid electric vehicles optimal energy-management strategies [J]. *IEEE Control System*, 2007, 27(2): 60 – 70.
- [7] GAO Y M, MEHRDAD E. Design and control methodology of plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(2): 633 – 640.
- [8] LAURA T, SIMONA O. Analysis of energy management strategies in plug-in hybrid electric vehicles: application to the GM chevrolet volt [C] // *2013 American Control Conference (ACC)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2013: 5966 – 5971.
- [9] GENG B, MILLS J K, SUN D. Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicles using the telemetry equivalent consumption minimization strategy [J]. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(9): 4238 – 4248.
- [10] GONG Q, LI Y, PENG Z R. Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2008, 57(11): 3393 – 3401.
- [11] O' KEEFE M P, MARKEL T. Dynamic programming applied to investigate energy management strategies for a plug-in HEV [R]. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory. Report No.: NREL/CP-540-40376, 2006.
- [12] SCOTT J M, HOSAM K F, DUNCAN S C, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(3): 545 – 555.
- [13] AO G Q, QIANG J X, ZHONG H, et al. Fuel economy and NOx emission potential investigation and trade-off of a hybrid electric vehicle based on dynamic programming [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(10): 1851 – 1864.
- [14] ROBERT C, FRANK W. Integrated emission management strategy for cost-optimal engine-aftertreatment operation [J]. *SAE Paper*, 2011-01-1310.
- [15] KONSTANDOPOULOS A G, KOSTOGLU M, SKAPERDAS E, et al. Fundamental studies of diesel particulate filters: transient loading regeneration and aging [J]. *SAE Paper* 2000-01-1016.
- [16] KONSTANDOPOULOS A G. Flow resistance descriptors for diesel particulate filters: definitions, measurements and testing [J]. *SAE Paper* 2013-01-0843.
- [17] MANSOUR M. Pressure drop of segmented diesel particulate filters [J]. *SAE Paper* 2005-01-0971.
- [18] WANG D, LIU Z C, HAN Y Q, et al. Experimental studies on pressure drop performance and regeneration safety of diesel particulate filter [C] // *International Conference on Electric Information and Control Engineering*. Wuhan, China: IEEE, 2011: 2175 – 2178.
- [19] GONG Jinke, DONG Xijun, LAI Tianguai, et al. Calculation and analyses of trapping characteristic of diesel particulate filters [J]. *Vehicle Engines*, 2005, (3): 24 – 27.
(龚金科, 董喜俊, 赖天贵, 等. 车用柴油机微粒捕集器捕集特性模拟计算与分析 [J]. *车用发动机*, 2005, (3): 24 – 27.)
- [20] KIM N, CHA S, PENG H. Optimal control of hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(5): 1279 – 1287.
- [21] FAJRI P, ASAEI B. Plug-in hybrid conversion of a series hybrid electric vehicle and simulation comparison [C] // *The 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*. Romania: IEEE, 2008: 287 – 292.

作者简介:

魏寒冰 (1979-), 男, 副教授, 博士, 目前研究方向为车辆动力传动及其控制技术、智能汽车控制技术, E-mail: hbwei@cqjtu.edu.cn;

刘小飞 (1990-), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为车辆动力传动及其控制技术, E-mail: liuxiaofei0321@163.com;

彭志远 (1967-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为混合动力汽车控制技术, E-mail: pengzy@changan.com.cn.