

基于 MPC 算法的 PHEV 发动机转矩 预测控制策略研究

孙 蕾¹, 林歆悠²

(1. 华侨大学机电与自动化学院, 福建厦门 361021;

2. 福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350002)

摘 要: 针对一款并联式混合动力系统的结构特点, 以提高其燃油经济性为目标, 开展局部工况下发动机转矩预测的控制策略研究。采用规则与优化算法相结合的方法, 在模式切换层上选定电池荷电状态(SOC)与表示负荷大小的加速踏板开度为控制参数。当系统进入联合驱动模式, 采用优化算法, 即以燃油消耗为优化目标价值函数, 发动机转矩为控制变量, 基于模型预测控制(MPC)算法建立局部工况时域预测滚动优化策略。为确定 MPC 的预测时域和权衡因子两个关键参数, 设计了相应的正交仿真实验方法。确定预测时域改变权衡因子, 选用预测时域 S 为 3s, 权衡因子分别为 0.0001、0.00001、0.000001。确定权衡因子改变预测时域, 则权衡因子选用 0.0001, 预测时域 S 分别为 3s、5s、10s。结果表明, 因子 λ 为 0.0001, 预测时域 S 为 3s 为最佳组合, 折合百公里等效综合油耗为 6.179 L/100 km。另外, 选用最佳组合参数所制定的策略与普通规则策略相比, 其燃油经济性提升 9.3%。通过以上对比实验, 进一步说明基于 MPC 算法的局部工况发动机转矩预测控制策略可有效改进燃油经济性。

关键词: 并联式混合动力汽车; 控制策略; 转矩分配; 模型预测控制

中图分类号: U462.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2019)01-0010-08

引言

应用于优化并联式混合动力系统转矩分配控制策略的算法已有很多, 如动态规划与极小值原理^[1]、遗传算法^[2]及粒子群算法^[3]、粒子群算法^[4]或遗传算法优化模糊规则^[5]等, 理论上这些方法可获得最佳控制效果, 但由于计算量巨大而难以用于实时控制。为获得接近理论上的最佳控制性能, 基于行驶工况预测的方法^[6-7]成为当前能量管理研究的热点。尤其近年来, 国内外学者采用模型预测控制(Model predictive control, MPC)的方法开展混合动力

汽车能量管理控制策略的优化^[8-10]。例如, 文献[11]采用 MPC 制定串联混合动力汽车能量管理策略, 并与动态规划和规则策略进行比较, 其结果表明采用 MPC 的控制策略可获得良好的控制性能。文献[12]采用 MPC 开展了再生制动预测控制研究。另外, 常见的是采用马尔可夫链的预测控制方法^[13], 以及马尔可夫链与 MPC 相结合的方法^[14]。但事实上, 面对实际控制器运算能力的限制, MPC 的实时控制应用问题仍待进一步解决。

综上所述, 本文针对一款并联式混合动力汽

收稿日期: 2018-08-04; 修回日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505086)

作者简介: 孙 蕾(1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事工业设计及新能源汽车研究。E-mail: 94072408@qq.com

林歆悠(1981-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事混合动力电动汽车控制研究。E-mail: linxinyou@fzu.edu.cn

车,为解决 MPC 优化控制实时性的问题,以提高燃油经济性为控制目标,拟采用规则与模型预测控制的方法,制定联合驱动模式局部工况下的发动机转矩预测控制策略,为后续进一步开展 MPC 能量管理策略提供理论参考。

1 并联混合动力系统及关键部件建模

1.1 并联混合动力系统建模

本文选用的并联式混合动力系统的动力传动部件由 67 kW 柴油发动机及 5 档自动变速、49 kW 主驱动电机构成,其中通过离合器的控制可实现纯电动模式、发动机单独驱动或充电以及联合驱动模式进行切换;另外,发动机通过变速器及主减速器进行动力传递驱动车辆行驶,而电机则通过专属的电机减速器传递扭矩,具体如图 1 所示。

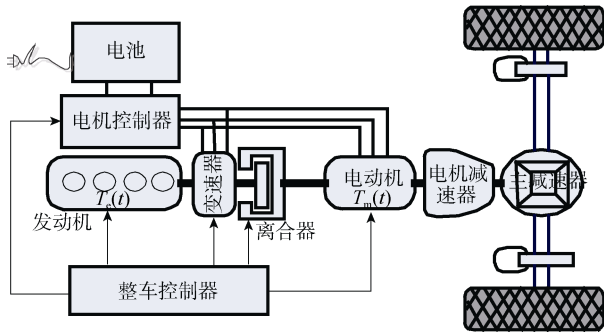


图 1 并联式混合动力系统

基于该并联混合动力系统的结构特点,可建立该系统的驱动转矩动力学模型,见式(1)。

$$\begin{cases} T_m(t) = \frac{T_{req}}{i_m \cdot i_0} & \text{-- 纯电动模式} \\ T_e(t) = \frac{T_{req}}{i_g \cdot i_0} & \text{-- 发动机驱动模式} \\ T_m(t) = \frac{T_{req}(t) - i_g \cdot i_0 \cdot T_{e_mpc}(t)}{i_m \cdot i_0} & \text{-- 联合驱动模式} \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_m 、 T_e 分别为驱动电机转矩、发动机转矩, T_{e_mpc} 为基于 MPC 的发动机预测转矩; i_m 、 i_g 、 i_0 分别为电机减速器(取值为 2.21)、变速器速比、主减速比(取值为 4.06); T_{req} 为驾驶员需求转矩,具

体如式(2)所示。

$$\begin{cases} T_{req}(t) = \alpha \cdot T_{d_max}(t) & 0 \leq \alpha \leq 1 \\ T_{req}(t) = \beta \cdot T_{b_max}(t) & -1 \leq \beta < 0 \\ T_{d_max}(t) = i_g \cdot i_0 \cdot T_{e_max}(t) + i_m \cdot T_{m_max}(t) \\ T_{b_max}(t) = T_{b_mec} + T_{re_max}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 T_{d_max} 、 T_{b_max} 分别为系统最大驱动转矩、系统最大制动转矩,其具体包括机械制动转矩 T_{b_mec} 以及电机再生制动最大转矩 T_{re_max} ; T_{e_max} 、 T_{m_max} 分别为发动机最大驱动转矩、电机最大驱动转矩; α 、 β 分别为加速踏板开度、制动踏板开度,其具体采用 PID 控制方法,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \alpha = k_1 \Delta v(t) + k_2 \int_0^t \Delta v dt + k_3 \frac{d\Delta v}{dt} & 0 \leq \alpha \leq 1 \\ \beta = k_1 \Delta v(t) + k_2 \int_0^t \Delta v dt + k_3 \frac{d\Delta v}{dt} & -1 \leq \beta \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 PID 调节系数; $\Delta v = v_{cyc} - v_{veh}$, v_{cyc} 、 v_{veh} 分别为循环工况车速与实现行驶车速。

1.2 关键动力部件模型

1.2.1 发动机燃油消耗模型

基于后续控制目标的需要,这里仅简单列出发动机燃油消耗计算模型,如式(4)所示。

$$fuel_{consume} = \int_{t_0}^{t_n} \frac{f(T_e, \omega_e)}{\rho_{fuel}} dt \quad (4)$$

式中, $fuel_{consume}$ 为在 t_0 至 t_n 一段时间内的燃油消耗; $f(T_e, \omega_e)$ 为燃油消耗率,表示为发动机转矩和转速的函数,其具体通过台架测试进行标定,如图 2 所示; ρ_{fuel} 为所用燃油的密度,单位为 g/L。

1.2.2 电机及电池 SOC 估算模型

电机的驱动功率即为电池输出功率,其具体计算如式(5)所示。

$$P_m = \frac{T_m \cdot \omega_m}{\eta_m(T_m, \omega_m)} \quad (5)$$

式中, P_m 为电机驱动功率, T_m 为电机驱动转矩, ω_m 为电机转速, $\eta_m(T_m, \omega_m)$ 为电机效率。

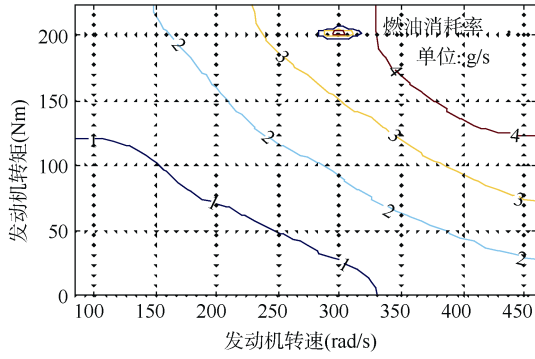


图2 发动机燃油消耗率

根据文献[15], 电池的等效电路、电池 SOC 可由式(6)和(7)联合估算。

$$\begin{cases} V_t = \sqrt{P_m(t) \cdot R_d} \\ I_d(t) = \frac{V_0 - V_t}{R_d} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}_0 - \frac{\int_0^t I_d(\tau) d\tau}{Q_c} \quad (7)$$

式中, V_t 为电池输出电压, 其具体可表示为电池 SOC 及温度的函数; V_0 为电池端电压; R_d 为电池内阻其具体可表示为电池 SOC 的函数, 其具体实验特性数据如图 3 所示; I_d 为电池工作电流; SOC_0 为电池初始荷电状态。

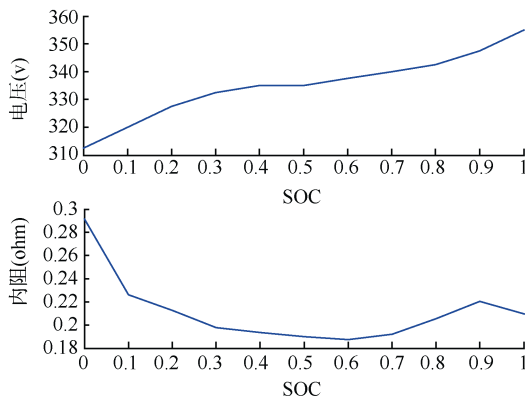


图3 电池特性图

2 转矩分配预测控制策略优化模型的构建

根据该动力系统的结构运行模式, 如式(1)定义所示, 当系统进入转矩分配联合驱动模式时,

采用基于模型预测进行转矩分配的优化控制策略。根据 MPC 的数学模型, 其具体描述可参见文献[16], 构建转矩分配优化目标价值函数, 见式(8)。

$$J = \sum_{i=1}^N \{ [f(i) - f_{ref}]^2 + \lambda [T_{e_vec}(i)]^2 \} \quad (8)$$

其中, $f(i)$ 为在 i 时刻下的燃油消耗率; f_{ref} 为参考燃油消耗率, 具体为 1 g/s ; λ 为权衡因子; $T_{e_vec}(i)$ 为在 i 时刻下的发动机预测转矩。

在这里定义 SOC 为状态变量, 发动机转矩为控制变量, 系统输出变量为燃油消耗率 f , 电机转矩 T_m , 发动机转矩 T_e , 电池荷电状态 SOC, 如式(9)。

$$\begin{cases} x = \text{SOC} \\ u = T_e \\ y = [f, T_m, T_e, \text{SOC}] \end{cases} \quad (9)$$

其中, 根据并联式混合动力系统, 驱动电机的转矩可计算为:

$$T_m = \frac{T_{req} - i_g i_0 u}{i_m \cdot i_0} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 系统状态、系统输出与控制变量可表示为:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \text{SOC}(t) \\ T_{req}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} u \\ m_f(u, \omega(t)) \\ \frac{T_{req} - i_g i_0 u}{i_m \cdot i_0} \\ \text{SOC}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 x_1 为 SOC, 可表示为:

$$\begin{cases} x_1 = \text{SOC}_0 - 100 \cdot \frac{\int_0^t f_{I_d}[u(\tau)] d\tau}{Q_c} \\ f_{I_d}[u(t)] = \frac{V_0 - V_t[u(t)]}{R_d} \\ V_t[u(t)] = \sqrt{\frac{[T_{req}(t) - i_g i_0 u(t)] \cdot \omega_m}{i_m \cdot \eta_m \{[1 - u(t)], \omega_m\}}} \cdot R_d \end{cases} \quad (13)$$

那么基于目标价值函数式(8), 可得发动机优化预测控制转矩:

$$u_{opt}(i) = \arg \min_{u(i)} [J_i(x)] \quad (14)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} T_{emin} \leq T_e(t) \leq T_{emax} \\ \omega_{emin} \leq \omega_e(t) \leq \omega_{emax} \\ T_{req} - T_{emax} \leq T_m \leq T_{req} - T_{emin} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (15)$$

当动力系统进入转矩分配联合驱动模式, 首先通过行驶车速计算当前档位, 基于模型预测控制思想, 根据加速踏板开度可计算未来 s 时间内的需求转矩序列, 即 $T_r(k+1)$ 、 $T_r(k+2)$ 、... $T_r(k+s)$, 进而可预测 s 时间内最佳发动机预测转矩向量。

以式(8)所定义的油耗价值函数最小为优化目标, 其中选定相应权衡因子 λ_1 计算在 k 时刻至 $k+s$ 内的最佳发动机转矩预测控制向量, 具体由式(14)所示, 即 $T_{e_vec}(k+1)$ 、 $T_{e_vec}(k+2)$ 、... $T_{e_vec}(k+s)$ 。该模型预测控制流程如图 4 所示。

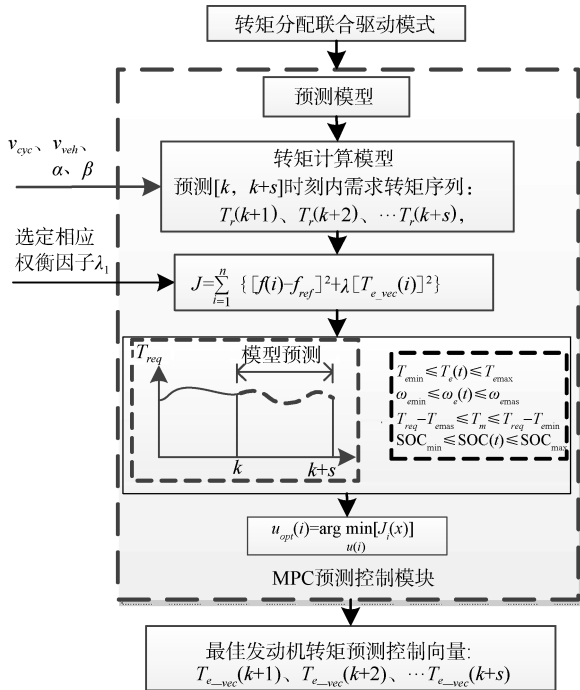


图 4 MPC 预测控制流程图

当发动机控制转矩确定, 通过式(10)即可获得

相应的驱动电机转矩 $T_m(k+1)$ 、 $T_m(k+2)$ 、... $T_m(k+s)$, 进而通过(5)至(7)可估算获得 $SOC(k+1)$ 、 $SOC(k+1)$ 、 $SOC(k+s)$ 。

3 仿真实验及结果分析

以某款混动车型为基础, 其具体参数为: 满载质量 M 为 2050 kg, 风阻系数与迎风面积的乘积 $C_d A = 0.76 \text{ m}^2$, 车轮半径 $r = 0.324 \text{ m}$, 主减速比 $i_0 = 4.06$, 五档变速器速比分别为 $i_g = [3.25, 1.81, 1.21, 0.86, 0.64]$ 。基于 Matlab/Simulink 结合 S-function 建立并联式混合动力系统转矩分配预测控制优化策略仿真模型, 选定一种城市行驶工况 UDDS, 以 SOC 初始值为 0.7 进行仿真实验。为获取较长行驶距离的仿真结果, 以 3 个 UDDS 进行实验, 其仿真结果如图 5 所示, 预计行驶车速与实际车速基本吻合。

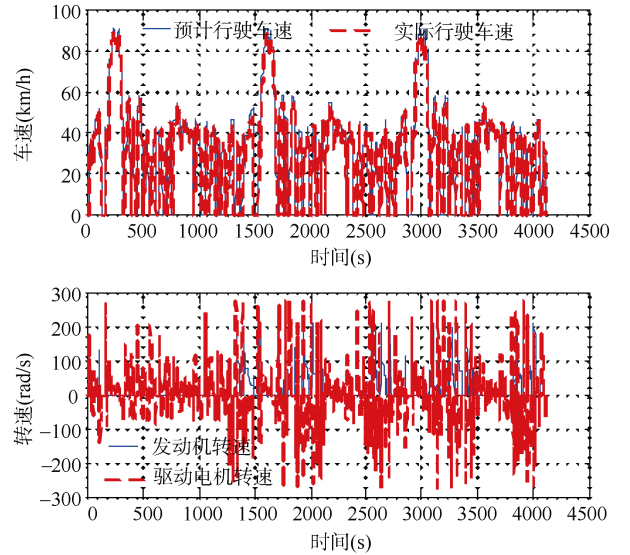


图 5 预计行驶车速与实际车速

为考查所制定的转矩分配预测控制优化策略对燃油经济性的改善效果, 暂不考虑换挡策略的影响因素。对于转矩分配预测控制优化策略而言, 具体需要考查的是权衡因子和预测时域两个参数的影响。由于篇幅所限, 将分别选用定预测时域变权衡因子和定权衡因子变预测时域的正交方法。

具体来说, 定预测时域变权衡因子, 选用预测时域 S 为 $3s$, 权衡因子分别为 0.0001 , 0.00001 , 0.000001 。定权衡因子变预测时域, 则权衡因子选用 0.0001 , 预测时域 S 分别为 $3s$, $5s$, $10s$ 三种。

定预测时域变权衡因子仿真实验结果如图6~图8所示。图6是预测时域 S 为 $3s$, 权衡因子分别为 0.0001 、 0.00001 、 0.000001 的实际转矩与预测优化转矩比较结果图。由图6可知, 在三种权衡因子中来看, 权衡因子 $\lambda=0.0001$ 时, 实际转矩与预测优化转矩最为吻合。从图7~图8的发动机工作点及油耗图也可知, 权衡因子 $\lambda=0.0001$ 的发动机工作点大部分落在参考油耗 $1g/s$ 的范围内, 从而也可通过最终的整车百公里油耗来说明, 比较三种权衡因子, 其中权衡因子 $\lambda=0.0001$ 获得最佳油耗。基于上述结果可以说明, 当预测时域固定时, 权衡因子数值最大者其燃油经济性最佳, 例如 $\lambda=0.0001$ 时, 其综合等效百公里油耗为 $6.179L$; $\lambda=0.00001$ 时, 其综合等效百公里油耗为 $6.971L$ 。具体来说, $\lambda=0.0001$ 的燃油经济性较 $\lambda=0.00001$ 提高了11%。

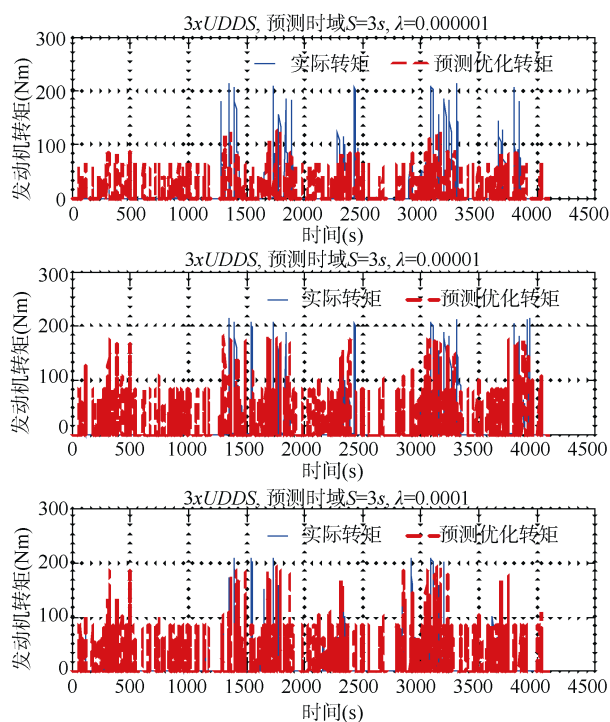


图6 $S=3s$ 时不同权衡因子下的发动机输出转矩

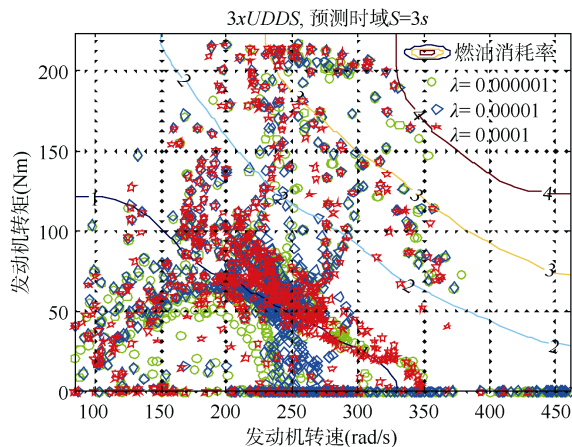


图7 $S=3s$ 时不同权衡因子下的发动机工作点

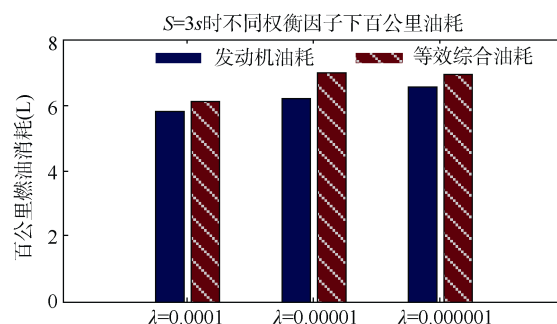


图8 $S=3s$ 时不同权衡因子下百公里油耗

图9~图12是权衡因子 $\lambda=0.0001$ 时, 预测时域分别为 $S=3s$ 、 $5s$ 、 $10s$ 定权衡因子变预测时域的仿真结果。其中, 图9为实际发动机转矩与预测优化转矩比较结果。总体来看, 预测时域越长, 其预测发动机优化转矩输出转矩越大而较为稳定, 如预测时域 $S=3s$ 时, 大部分以 $100Nm$ 左右的扭矩在运行, 而 $S=10s$ 时, 则输出转矩上升为 $200Nm$ 左右。

与上述发动机输出转矩相对应的发动机工作点、系统运行模式及变速器档位见图10、图11。由图10可知, 预测时域 $S=3s$ 时的发动机工作点相比 $S=5s$ 、 $10s$ 更集中在参考油耗 $1g/s$ 的范围内。那么从图11系统的运行模式可知, 预测时域较长时, 经常运行于发动机单独驱动模式或充电模式。这一点最终可以从通过电池SOC以及燃油消耗得到进一步印证, 如图12所示。最后定权衡因子 $\lambda=0.0001$ 折合百公里等效综合油耗: $S=3s$ 时为 $6.179L/100km$, $S=5s$ 时为 $6.824L/100km$,

$S=10\text{ s}$ 时为 $6.889\text{ L}/100\text{ km}$ 。由等效综合油耗来看, $S=3\text{ s}$ 比 $S=10\text{ s}$ 燃油经济性提高了 10.3% 。

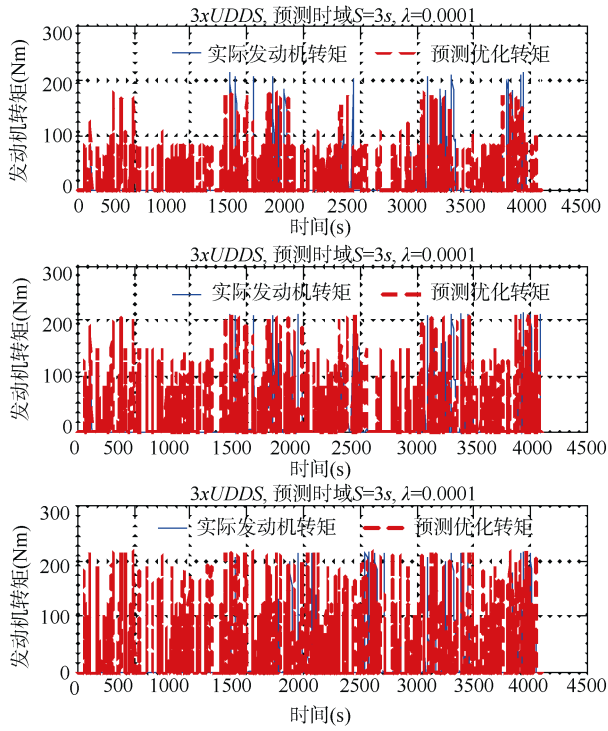


图 9 $\lambda=0.0001$ 时不同预测时域下发动机输出转矩

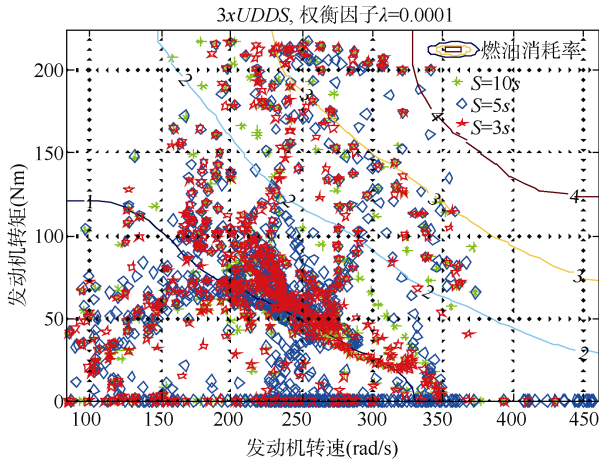


图 10 $\lambda=0.0001$ 时不同预测时域下发动机工作点

通过上述定预测时域变权衡因子和定权衡因子变预测时域的正交方法仿真结果分析可知, 对于所制定的转矩分配预测优化控制策略, 选定预测时域 $S=3\text{ s}$, 权衡因子 $\lambda=0.0001$ 时并联动力系统的经济性能表现最佳, 并与基于规则的普通策略进行对比, 其燃油经济性提升了 9.3% , 具体

如图 13 所示。从而说明, 所制定的基于局部工况发动机转矩预测控制策略可有效提升燃油经济。上述结果为进一步开展基于模型预测控制的能量管理策略提供了理论基础, 也为后续开展智能交通系统预测控制提供了研究思路。

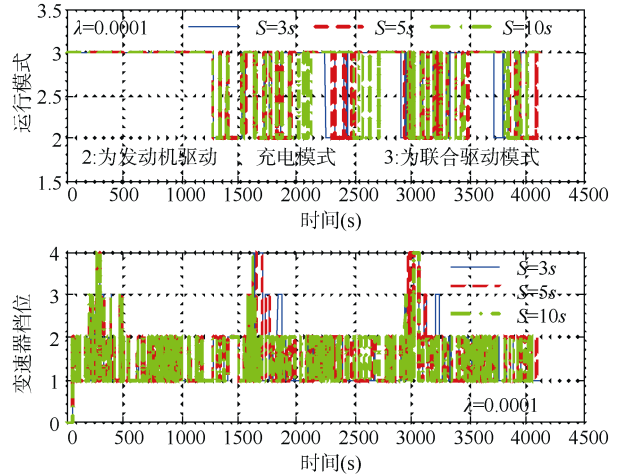


图 11 $\lambda=0.0001$ 时不同预测时域下的运行模式与档位

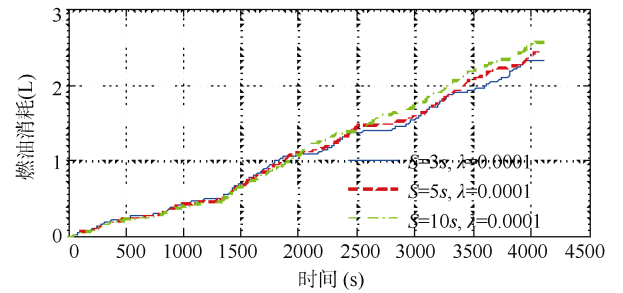


图 12 $\lambda=0.0001$ 时不同预测时域下的经济性比较

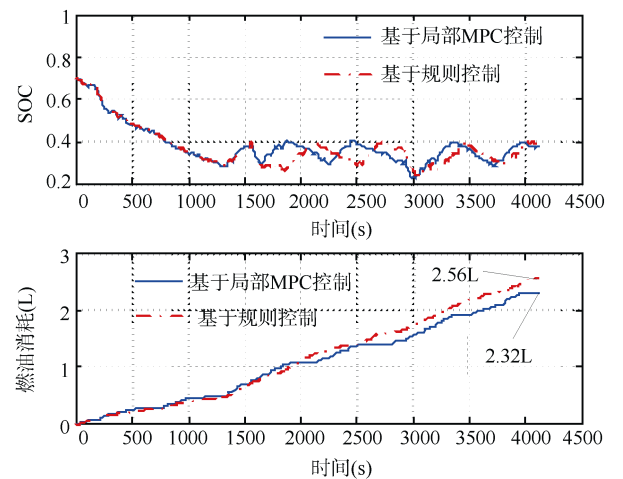


图 13 局部 MPC 控制与基于规则控制仿真结果对比

4 结论

本文以提高一款并联式混合动力乘用车的燃油经济性为旨归, 基于模型预测控制参数, 以发动机燃油消耗最小为优化目标, 以发动机转矩为控制向量, 开展联合驱动模式下的局部工况转矩分配预测控制策略优化。

为获得最佳预测控制参数, 设计定预测时域变权衡因子和定权衡因子变预测时域的正交方法进行仿真实验验证, 其结果表明: 预测时域 $S=3s$ 与权衡因子 $\lambda=0.0001$ 为最佳控制参数组合, 较 $S=10s$ 燃油经济性提升 10.3%。进而表明所制定的局部工况转矩分配预测优化控制策略可有效提升并联式燃油经济性, 并为进一步开展基于模型预测控制的能量管理策略提供了理论基础。

参考文献

- [1] Zou Yuan, Liu Teng, Sun Fengchun, et al. Comparative study of dynamic programming and Pontryagin's minimum principle on energy management for a parallel hybrid electric vehicle[J]. *Energies* 2013, 6: 2305-2318.
- [2] 张 昕, 宋建峰, 田 毅, 等. 基于多目标遗传算法的混合动力电动汽车控制策略优化[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 36-40.
- [3] Chen Zeyu, Xiong Rui, Cao Jiayi. Particle swarm optimization-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles considering uncertain driving conditions[J]. *Energy*, 2016, 96: 197-208.
- [4] 尹安东, 赵 韩, 张 辉. 基于模糊控制与微粒群优化的混合动力客车控制策略的研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(7): 553-557.
- [5] Poursamad A, Montazeri M. Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16: 861-873.
- [6] 林歆悠, 翟柳清, 林海波. 基于行驶工况的混合动力电动汽车能量管理策略研究现状分析[J]. *河北科技大学学报*, 2016, 37(5): 457-463.
- [7] Hung Yanjun, Wang Hong, Amir K, et al. Model predictive control power management strategies for HEVs: A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 341: 91-106.
- [8] Zhang Jiangyan, Shen Tielong. Real-Time fuel economy optimization with nonlinear MPC for PHEVs[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(6): 2167-2174.
- [9] 赵 韩, 吴 迪. ISG 混合动力汽车模型预测控制策略研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(1): 1-5.
- [10] Xiang Changle, Ding Feng, Wang Weida, et al. Energy management of a dual-mode power-split hybrid electric vehicle based on velocity prediction and nonlinear model predictive control[J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 640-653.
- [11] Wang Hong, Huang Yanjun, Amir K, et al. Model predictive control-based energy management strategy for a series hybrid electric tracked vehicle[J]. *Applied Energy*, 2016, 182: 105-114.
- [12] 舒 红, 郑 军, 胡明辉, 等. 基于模型预测控制的混合动力汽车下坡再生制动策略[J]. *汽车工程*, 2013, 35(9): 775-780.
- [13] 孟凡博, 黄开胜, 曾祥瑞, 等. 基于马尔可夫链的混合动力汽车模型预测控制[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(19): 2692-2697.
- [14] 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.
- [15] Yan Fengjun, Wang Junmin, Huang Kaisheng. Hybrid Electric Vehicle Model Predictive Control Torque-Split Strategy Incorporating Engine Transient Characteristics[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(6): 2458-2467.
- [16] Balaji S, Lorenzo S, Simona O, et al. Model predictive Control as an energy management strategy for hybrid electric vehicles[J]. *ASME Proceedings*, 2009: 249-256.

Investigation of MPC-based Engine Torque Prediction Control Strategy for a Parallel Hybrid Electric Vehicle

Sun Lei¹, Lin Xinyou²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To improve the fuel economy of a parallel hybrid power vehicle, the torque distribution strategy based on engine prediction is investigated. The proposed approach combines the rule logic and optimization algorithm. The 'state-of-charge' and acceleration rate are selected as the control parameters for the mode transition. When the system is working in the torque-split mode, the model predictive control (MPC) of the optimization algorithm is implemented to establish the receding horizon predictive control optimization strategy. The fuel consumption is defined as the target cost function and the engine torque serves as the control variable. The orthogonal simulation experiment is carried out to examine the two MPC parameters, which are the prediction horizon and weight coefficient. Specifically, the prediction time domain variable tradeoff factor was determined. The prediction time domain S was chosen as 3 s, and the tradeoff factors were 0.0001, 0.00001, and 0.000001, respectively. In the prediction time domain of constant tradeoff variable, the tradeoff factor is 0.0001, and the prediction time domain S are 3 s, 5 s, and 10 s respectively. The results indicate that the best solution is the group consisting of the prediction horizon $S = 3$ s and weight coefficient $\lambda = 0.0001$; the equivalent integrated fuel consumption for 100 km is 6.179 L/100 km. In addition, comparison of the proposed strategy and the rule-based strategy showed that the former increased fuel economy by 7.8%. Through the above comparative experiments, the effectiveness of the MPC algorithm for improving fuel economy is further demonstrated.

Key words: parallel hybrid electric vehicle; control strategy; torque distribution; model predictive control