

文章编号:1008-1542(2015)05-0480-07

doi:10.7535/hbkd.2015yx05006

基于交通信号灯信息的混合动力汽车 节能预测控制方法

余开江¹,许孝卓¹,胡治国¹,梁青²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院,河南焦作 454000;2. 河南理工大学计算机科学与技术学院,河南焦作 454000)

摘要:针对传统混合动力汽车控制方法不考虑已知道路交通信号灯信息对车辆能量管理影响的问题,提出了基于交通信号灯信息的混合动力汽车节能预测控制智能优化策略。通过建立混合动力汽车系统的简化模型,并采用连续广义最小残量方法求解模型预测控制问题。运用 MATLAB/Simulink 进行仿真,仿真结果验证了交通信号灯信息模型的有效性,以及所设计的模型预测控制算法大幅度提高混合动力汽车的燃油经济性的能力和实时控制性能。研究结果表明所提出的控制策略可以实现车辆行驶轨迹的优化控制,显著提高了车辆的燃油经济性,并满足系统的实时最优控制要求。

关键词:模型预测控制;混合动力汽车;交通信号灯信息;节能预测控制;MATLAB/Simulink 仿真

中图分类号:U469.72;TP273.1 **文献标志码:**A

Predictive control strategies for energy saving of hybrid electric vehicles based on traffic light information

YU Kaijiang¹, XU Xiaozhuo¹, HU Zhiguo¹, LIANG Qing²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: As the conventional control method for hybrid electric vehicle doesn't consider the effect of known traffic light information on the vehicle energy management, this paper proposes a model predictive control intelligent optimization strategies based on traffic light information for hybrid electric vehicles. By building the simplified model of the hybrid electric vehicle and adopting the continuation/generalized minimum residual method, the model prediction problem is solved. The simulation is conducted by using MATLAB/Simulink platform. The simulation results show the effectiveness of the proposed model of the traffic light information, and that the proposed model predictive control method can improve fuel economy and the real-time control performance significantly. The research conclusions show that the proposed control strategy can achieve optimal control of the vehicle trajectory, significantly improving fuel economy of the vehicle, and meet the system requirements for the real-time opti-

收稿日期:2015-01-26;修回日期:2015-04-08;责任编辑:李穆

基金项目:国家自然科学基金(51405137);河南省高等学校重点科研项目(15A470014);焦作市 2014 年科技计划项目(2014110013);河南理工大学创新型科研团队支持计划项目;河南理工大学博士基金

作者简介:余开江(1985—),男,河南信阳人,讲师,日本九州大学博士,主要从事车辆控制和模型预测控制方面的研究。

E-mail:yu.kaijiang@163.com

余开江,许孝卓,胡治国,等.基于交通信号灯信息的混合动力汽车节能预测控制方法[J].河北科技大学学报,2015,36(5):480-486.

YU Kaijiang, XU Xiaozhuo, HU Zhiguo, et al. Predictive control strategies for energy saving of hybrid electric vehicles based on traffic light information[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(5): 480-486.

mal control.

Keywords: model predictive control; hybrid electric vehicles; traffic light information; predictive control strategy for energy saving; MATLAB/Simulink simulation

混合动力汽车是中国目前处理能源危机和环境污染的有效途径之一。目前混合动力汽车的控制策略采用基于规则的控制策略^[1],这种控制策略无法保证系统的最优化。而传统的动态规划算法需要预知车辆未来全部工况信息,以实现系统的全局最优化,但在车辆实际行驶中无法获得车辆未来全部工况信息。由于智能交通系统的快速发展,车辆未来的部分工况信息可以由智能交通系统提供,充分利用这类已知道路交通信息,设计混合动力汽车预测控制算法,能够有效提高车辆的燃油经济性。

文献[2]中提出了基于预测控制的混合动力汽车能量管理策略,策略中对车辆的速度模式进行了预测,提高了车辆的燃油经济性。由于混合动力汽车具有多动力,可以使用排量更小的发动机,调节发动机工作点,回收再生制动能量,使车辆工作于电动模式,可以提高车辆的燃油经济性和降低排放^[3-6]。

文献[7]—文献[9]通过制定规则,建立交通信号信息模型,对车辆的速度模式进行了控制,取得了很好的燃油经济性。文献[10]中采用动态规划求解混合动力汽车的模型预测控制问题,并运用等效油耗最小控制方法对预测控制算法进行了改进,大幅度提高了车辆的燃油经济性。文献[11]—文献[13]中利用道路坡度信息预测车辆的未来工况,提出了基于查表方法的道路坡度模型,对车辆的未来工况进行了预测。文献[14]提出了基于简化系统模型的混合动力汽车模型预测控制方法,并对道路坡度信息进行了建模。文献[15]提出了基于前行车速度信息的 3 自由度系统模型的混合动力汽车模型预测控制方法,对前行车的速度模式进行了建模和预测。文献[16]提出了基于蓄电池电量使用最大化的混合动力汽车模型预测控制方法,并应用于商用混合动力汽车仿真平台 GT-SUITE。

本文结合混合动力汽车城市道路行驶的实际,针对混合动力汽车能够利用电机调节发动机工作点的特点,采用简化的系统结构模型,提出了基于交通信号灯信息的混合动力汽车模型预测实时控制系统,并成功应用于 MATLAB/Simulink 仿真平台,取得了显著的成效,为基于已知道路交通信息的混合动力汽车系统的成功实施奠定了基础。

1 模型构建

行星齿轮式混联混合动力汽车包含 5 大动态部件,如图 1 所示。它们是发动机、行星齿轮机构、蓄电池、2 个电机和车轮。行星齿轮作为动力分配装置既有速度耦合器的作用,又有电子无极变速器作用。根据车辆机械耦合和电子耦合关系,可以列写系统动力学方程。对动力学方程解耦,最终可以获得系统的状态空间模型,如式(1)所示^[17-19]。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u); \\ x &= [x_1 \ v \ x_{SOC}]^T; \\ u &= [u_1 \ P_{batt}] \end{aligned}$$

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} v \\ u_1(t) - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 / m - g \mu - g \sin(\theta(x_1)) \\ - \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4 P_{batt} R_{batt}}}{2 R_{batt} Q_{batt}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x 为状态量; u 为控制量; x_1 为车辆位置; v 为车辆速度; x_{SOC} 为蓄电池荷电状态; u_1 为车辆加减速度的控制量; P_{batt} 是蓄电池功率;参数 ρ, C_D, A, m, g, μ 和 θ 是空气密度、空气阻力系数、车辆迎风面积、车辆质量、重力加速度、滚动阻力系数和道路坡度; V_{OC}, R_{batt} 和 Q_{batt} 是蓄电池开路电压、内阻和容量。

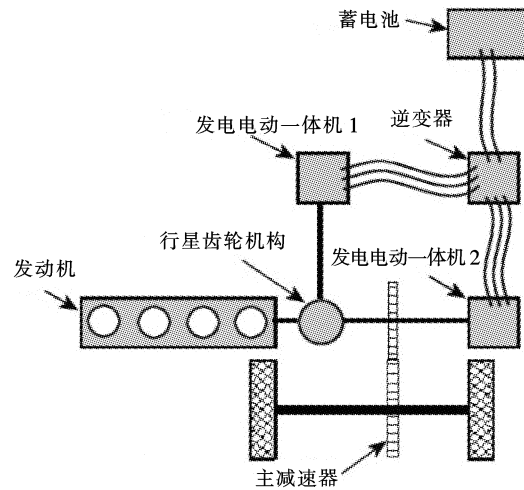


图 1 功率分割式混合动力汽车结构

Fig. 1 Configuration of the power-split plug-in hybrid electric vehicle

车辆的燃油经济性评价采用威兰氏线性模型,如式(2)所示:

$$\dot{m}_f(t) = \dot{m}_f(P_{\text{req}}(t) - P_{\text{batt}}(t)) \approx c_f(P_{\text{req}}(t) - P_{\text{batt}}(t)), \quad (2)$$

式中: m_f 为燃油消耗率;参数 P_{req} 为车辆需求功率; c_f 为常数参数。

2 模型预测控制策略

基于交通信号灯信息的混合动力汽车能量管理模型预测最优控制策略的步骤:首先确定交通信号灯信息模型;其次运用所建立的数学模型和公式化控制策略求解最优控制问题;最后应用所求得的最优控制序列的第1个控制量于系统。由于模型预测控制为区间最优控制,所以其求得的最优控制量是数量为预测区间除以采样间隔的序列。最优控制序列的第1个控制量与实际状态最接近,所以一般采用它来作为实际的控制量。

模型预测控制的基本原理为在每一个采样时刻,根据预测模型对系统未来代价函数进行预测,通过对未来预测区间内的性能指标进行优化,并根据实测对象的输出进行反馈校正,将控制策略设计转化为优化过程,通过求解相应预测区间的优化问题得到控制序列,并将序列的第1个控制量作用于系统,实现反馈控制,之后在下一个采样时刻,将预测区间向前推进一步,不断重复该过程。总结来说其包括3部分:预测模型,滚动优化和反馈控制。通过对未来系统输入的预测可以实现对系统的实时最优控制。

本控制策略的特色有2点:第一,尽量采用蓄电池能量的控制策略,以更好地利用混合动力汽车蓄电池容量大的特点,回收更多的免费再生制动能量;第二,运用2种模型预测控制器切换的策略解决交通信号灯信息模型不连续的问题。上述两大特色在控制策略设计中评价函数里有相应体现,为混合动力汽车系统性能提高提供了更大可能性。本方法考虑路口红绿灯剩余时间、路口限制速度等条件,综合平衡车辆燃油经济性和安全性实现最优控制。

预测模型已在上部分论述。

定速行驶时的最优控制问题1定义如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \text{minimize } J_{\text{opt1}} &= \int_t^{t+T} L_{\text{opt1}}(x(\tau | t), u(\tau | t)) dt, \\ \text{subject to } P_{\text{battmin}} &\leq P_{\text{batt}}(\tau | t) \leq P_{\text{battmax}}, \\ u_{1\text{min}} &\leq u_1(\tau | t) \leq u_{1\text{max}}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: T 为预测区间; $u_{1\text{min}}, u_{1\text{max}}, P_{\text{battmin}}$ 和 P_{battmax} 为控制量约束; τ 为虚拟时间; t 为实际时间。

评价函数定义如式(4)所示。

$$\begin{aligned} L_{\text{opt1}} &= w_x L_x + w_y L_y + w_z L_z + w_d L_d + w_e L_e + w_f L_f, \\ L_x &= (u_1 - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 / m - g \mu)^2, \\ L_y &= (v - v_d)^2, \\ L_z &= c_f (m u_1 v - P_{\text{batt}}) / (1 + e^{(-\beta (m u_1 v - P_{\text{batt}}))}), \\ L_d &= (x_{\text{SOC}} - \text{SOC}_d)^2, \\ L_e &= (m u_1 v - P_{\text{batt}})^2, \\ L_f &= -\ln(x_{\text{SOC}} - \text{SOC}_{\text{min}}) - \ln(\text{SOC}_{\text{max}} - x_{\text{SOC}}), \end{aligned} \quad (4)$$

式中: w_x, w_y, w_z, w_d, w_e 和 w_f 是权重系数; β 为常数参数; SOC_{min} 和 SOC_{max} 为参数约束,障碍函数用于处理系统状态约束; SOC_d 是目标蓄电池荷电状态; v_d 是车辆目标速度,它取值为车辆最速等速燃油经济性速度。

及时通过交通信号灯的最优控制问题2定义如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \text{minimize } J_{\text{opt2}} &= \int_t^{t+T} L_{\text{opt2}}(x(\tau | t), u(\tau | t)) d\tau, \\ \text{subject to } P_{\text{battmin}} &\leq P_{\text{batt}}(\tau | t) \leq P_{\text{battmax}}, \\ u_{1\text{min}} &\leq u_1(\tau | t) \leq u_{1\text{max}}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: T 为预测区间; $u_{1\text{min}}, u_{1\text{max}}, P_{\text{battmin}}$ 和 P_{battmax} 为控制量约束。

评价函数定义如式(6)所示。

$$\begin{aligned}
 L_{opt2} &= w_{x2}L_{x2} + w_{y2}L_{y2} + w_{z2}L_{z2} + w_{d2}L_{d2} + w_{e2}L_{e2} + w_{f2}L_{f2} + w_{g2}L_{g2} + w_{h2}L_{h2}, \\
 L_{x2} &= (u_{12} - \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 / m - g\mu)^2, \\
 L_{y2} &= (v - v_d)^2, \\
 L_{z2} &= c_f(mu_1 v - P_{batt}) / (1 + e^{(-\beta(mu_1 v - P_{batt}))}), \\
 L_{d2} &= (x_{SOC} - SOC_d)^2, \\
 L_{e2} &= (mu_1 v - P_{batt})^2 \\
 L_{f2} &= -\ln(x_{SOC} - SOC_{min}) - \ln(SOC_{max} - x_{SOC}), \\
 L_{g2} &= \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(T_d - \tau))} ((T_d - \tau)v - (X_d - x_1))^2, \\
 L_{h2} &= \frac{1}{1 + \exp(-\alpha(T_d - \tau))} \exp(-k(\frac{X_d - x_1}{v})),
 \end{aligned} \tag{6}$$

式中: $w_{x2}, w_{y2}, w_{z2}, w_{d2}, w_{e2}, w_{f2}, w_{g2}$ 和 w_{h2} 是权重系数; T_d 和 X_d 为信号灯由红变绿或者由绿变红的时间点, 交通信号灯的位置。

为保证系统的实时最优性能, 运用基于哈密顿方程的数值快速求解方法来求解上述最优控制问题。由于其只需有限几次迭代就可以计算出数值方程的最优解, 这种方法的在线性能很好。而且由于其基于哈密顿方程, 这种解法的稳定性可以得到保证。解法具体来说, 运用极小值原理将最优控制问题转化为两点边值问题, 在处理哈密顿函数相关的微分方程组和代数方程组时采用部分空间法求解, 这是一种 GMRES 解法^[20]。

最优控制问题 1 和最优控制问题 2 的切换依据车辆能否在绿灯阶段通过交通信号灯的结果。如能通过, 则求解最优控制问题 1, 否则求解最优控制问题 2, 选择及时通过交通信号灯的车辆速度。

在每个采样时刻: 首先, 测取蓄电池荷电状态等实时状态信号; 其次, 确定交通信号灯时变信息, 并制作表格; 再次, 根据建立的车辆模型和最优控制问题, 利用上述数值快速解法求解预测区间内的最优控制序列。应用预测区间内的最优控制序列的第 1 个控制量于车辆。之后在下一个采样时刻, 将预测区间向前推进一步, 如此循环往复, 实现在线最优控制。

最优控制问题中的非等式约束通过引入虚拟输入 u_d 转化为等式约束

$$C(x, u) = (u^2 + u_d^2 - u_{max}^2) / 2 = 0, \tag{7}$$

式中 u_{max} 代表控制量输入的极限值。

为求解上述最优控制问题, 哈密顿函数定义如下:

$$H(x, u, \lambda, \mu) = L(x, u) + \lambda^T f(x, u) + \mu^T C(x, u), \tag{8}$$

式中: λ 代表协状态; μ 代表拉格朗日乘数。

最优控制量 u , 拉格朗日乘数 μ , 协状态 λ 的驻点条件是:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= f(x, u), x(t_0) = x_0, \\
 \dot{\lambda} &= -\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^T, \lambda(t+T) = 0, \\
 \frac{\partial H}{\partial u} &= 0, \\
 C(x, u) &= 0,
 \end{aligned} \tag{9}$$

式中: t_0 是初始时间; x_0 是初始状态。

上述驻点条件可以转化为

$$F(U(t), x(t), t) := \begin{pmatrix} H_u^T(u_0, x_0, \lambda_1, \mu_0) \\ C(u_0, x_0) \\ \vdots \\ H_u^T(u_{N-1}, x_{N-1}, \lambda_N, \mu_{N-1}) \\ C(u_{N-1}, x_{N-1}) \end{pmatrix} = 0, \tag{10}$$

$$U(t) \triangleq [u_0^T(t), \mu_0^T(t), \dots, u_{N-1}^T(t), \mu_{N-1}^T(t)], \tag{11}$$

方程(10)和方程(11)等价于:

$$\begin{cases} F(U(0), x(0), 0) = 0, \\ \dot{F}(U(t), x(t), t) = -\xi F(U(t), x(t), t), \end{cases} \quad (12)$$

如果雅可比矩阵 F_U 非奇异,则

$$\dot{U} = F_U^{-1}(\xi F - F_{x\dot{x}} - F_t). \quad (13)$$

上述差分方程可以由广义最小残量方法求解. 这是一种连续广义最小残量方法. 因为没有必要用迭代方法求解雅可比矩阵和线性方程,这种方法计算量很小,能够满足实时最优控制的要求. 本解法在文献[20]中有详细论述,在此不在赘述.

控制策略流程图如图 2 所示. 混合动力汽车能量管理模型预测最优控制策略的步骤为首先采集道路坡度信息和交通信号灯信息;其次运用所建立的数学模型和公式化控制策略求解最优控制问题;最后应用所求得的最优控制序列的第 1 个控制量于系统. 由于模型预测控制为区间最优控制,所以其求得的最优控制量是数量为预测区间除以采样间隔的序列. 最优控制序列的第 1 个控制量与实际状态最接近,所以一般采用它来作为实际的控制量.

3 仿真与分析

本算法采用 MATLAB/Simulink 仿真平台进行验证. 混合动力汽车参数采用丰田普锐斯混合动力汽车的数据. 道路坡度信息和交通信号灯信息采用实测数据. 模型预测控制策略由 MATLAB/Simulink S-Function Builder 实现. 仿真采取 Gipps 方法^[21]作为对比,这种方法不能利用未来道路坡度和交通信号灯信息. 系统仿真结构如图 3 所示. 仿真系统包括模型预测控制器、车辆动力部件控制量发生器、状态观察器. 模型预测控制器实现了本文中的控制策略. 车辆动力部件控制量发生器由模型预测控制器产生的控制量计算产生发动机和电机的转矩控制量. 状态观察器可以观察蓄电池荷电状态、车辆位置和速度信息.

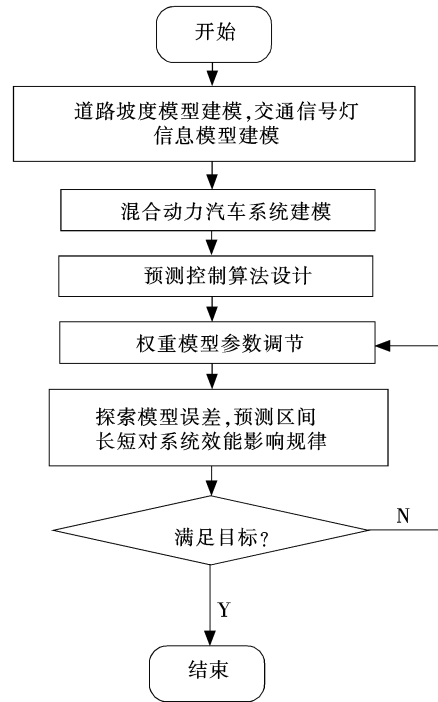


图 2 模型预测控制策略流程图

Fig. 2 Flowchart of the model predictive control strategy

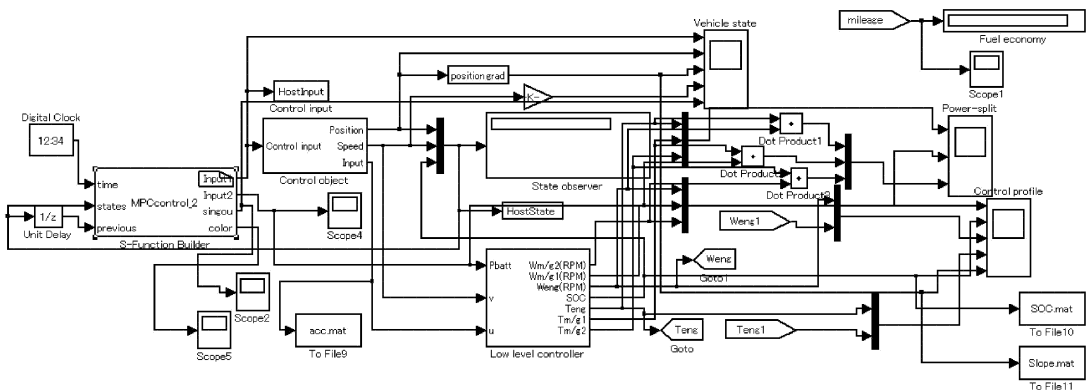


图 3 系统仿真结构图

Fig. 3 Simulink model of the proposed system

仿真结果如图 4 和图 5 所示. 模型预测控制方法车辆时空轨迹变化结果如图 4 所示. 横坐标为时间信息,纵坐标为车辆位置信息. 通过预测未来交通信号灯信息,车辆能够提前加速或者减速,选择合适时机通过交通信号灯,没有在交通信号灯红灯时停车,通过这种方式节省燃料和旅行时间. 模型预测控制方法下车辆的速度和荷电状态变化结果如图 5 所示. 通过预测未来道路坡度和交通信号灯信息,蓄电池能够提前进

行充放电,利用下坡回收的再生制动能量节省燃料。

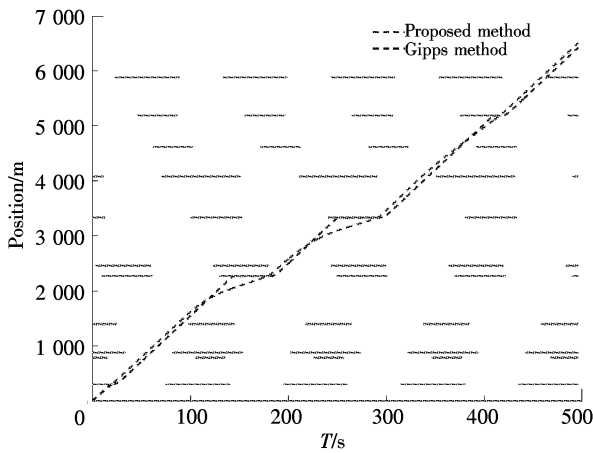


图 4 车辆时空轨迹变化
Fig. 4 Trajectories of vehicles

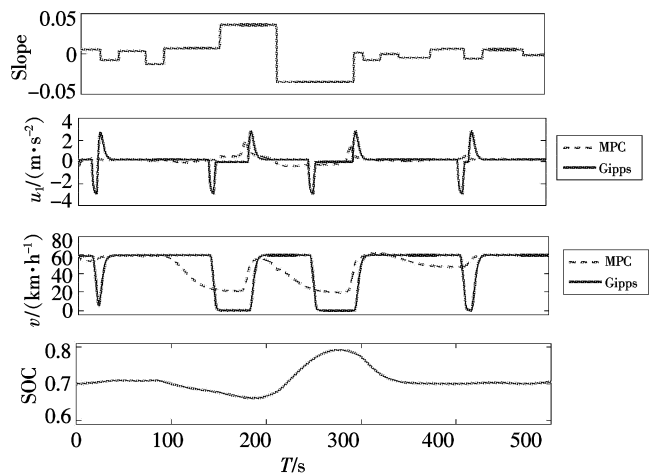


图 5 车辆速度和荷电状态变化
Fig. 5 variation of vehicle speed and the hopwer

表 1 为 2 种控制策略下的车辆燃油经济性数据对比。和传统的混合动力汽车数据对比(丰田普锐斯的燃油经济性为 18 km/L),混合动力汽车的燃油经济性有了显著提高。

本算法的计算速度很快。仿真时间为 500 s,而计算时间只需 137 s。单位采样间隔下的计算时间只有采样间隔的 1/4 左右。所以本算法是有可能实现实时最优控制的。

表 1 燃油经济性对比
Tab. 1 Fuel economy comparison

方法	初始蓄电池荷电状态	终端蓄电池荷电状态	燃油经济性/(km · L ⁻¹)
模型预测控制	0.700	0.705	34.2(+1.79%)
Gipps 控制	0.700	0.682	33.6

4 结 论

本文提出了基于交通信号信息的混合动力汽车模型预测控制系统。本系统在 MATLAB/Simulink 仿真平台中成功应用,可以实现实际道路交通条件下车辆行驶过程的优化控制,显著提高了车辆的燃油经济性,并满足系统的实时最优控制要求,具有很高的应用价值。后续研究可以集中于车辆悬挂^[22]和车辆制动^[23]等方面。

参考文献/References:

[1] WIPKE K B, CUDDY M R, BURCH S D. ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 1751-1761.

[2] KOOT M, KESSELS J T B A, JAGER B, et al. Energy management strategies for vehicular electric power systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 771-782.

[3] YU Kaijiang, YANG Junqi, ZHAO Yuxin. Performance of a nonlinear real-time optimal control system for HEVs/PHEVs during car following[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014; 10: 1155/2014/879232.

[4] SABOOHI Y, FARZANEH H. Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption [J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 1925-1932.

[5] SCARRETTA A, GUZZELLA L. Control of hybrid electric vehicles[J]. IEEE Control Syst Mag, 2007, 27(2): 60-70.

[6] MOURA S J, FATHY H K, CALLAWAY D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Trans Control Syst Technol, 2011, 19(3): 545-555.

[7] ZHOU B, CAO J, ZENG X, et al. Adaptive traffic light control in wireless sensor network-based intelligent transportation system[C]//

- Vehicular Technology Conference. Ottawa;IEEE, 2010:1-5.
- [8] ASADI B, VAHIDI A. Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time[J]. IEEE Trans Actions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 707-714.
- [9] Japan Society of Traffic Engineers. Manual on Traffic Signal Control -Revised Edition[M]. Tokyo; MARUZEN Co Ltd, 2006.
- [10] BORHAN H, VAHIDI A, PHILLIPS A M, et al. MPC-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle[J]. IEEE Trans Control Syst Technol, 2012, 20(3):593-603.
- [11] HELLSTROM E, ASLUND J, NIELSEN L. Design of a well-behaved algorithm for on-board look-ahead control[C]//Proceeding of IFAC World Congr. Seoul;IFAC, 2008:301-306.
- [12] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. Ecological vehicle control on roads with up-down slopes[J]. IEEE Trans Intell Transp Syst, 2011, 12(3):783-794.
- [13] DEGUCHI Y, KAWABE T. HEV charge/discharge control system based on navigation information[J]. SAE Paper, 2004-12-28, 2004.
- [14] YU K, MUKAI M, KAWABE T. Model predictive control of a power-split hybrid electric vehicle system[J]. Artificial Life and Robotics, 2012, 17(2): 221-226.
- [15] YU K, MUKAI M, KAWABE T. Performance of an eco-driving nonlinear MPC system for a power-split HEV during car following[J]. SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 2014, 7(1): 55-62.
- [16] YU K, MUKAI M, KAWABE T. A battery management system using nonlinear model predictive control for a hybrid electric vehicle [C]//7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control. Tokyo;IFAC, 2013:301-306.
- [17] EHSANI M, GAO Y, EMADI A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [18] LIU J M, PENG H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle[J]. IEEE Trans Control Syst Technol, 2008, 16(6): 1242-1251.
- [19] ROTENBERG D, VAHIDI A, KOLMANOVSKY I. Ultracapacitor assisted powertrains: Modeling, control, sizing, and the impact on fuel economy[J]. IEEE Trans Control Syst Technol, 2011, 19(3):576-589.
- [20] OHTSUKA T. A continuation/GMRES method for fast computation of nonlinear receding horizon control[J]. Automatica, 2004, 40(4):563-574.
- [21] GIPPS P G. A behavioural car-following model for computer simulation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(2):105-111.
- [22] 李明, 金炜东, 金光大. 基于最小方差控制的列车横向半主动悬挂控制系统设计[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(5):435-439.
LI Ming, JIN Weidong, JIN Guangda. Design of train lateral semi-active suspension control system based on minimum variance control [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(5):435-439.
- [23] 潘楠, 羿泽光. 基于频域盲信号处理的汽车制动异响定位方法研究[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(5):410-416.
PAN Nan, YI Zeguang. Study of abnormal sound localization method in automobile brake based on frequency-domain blind signal processing[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(5):410-416.