

文章编号:1000-582X(2011)05-036-06

## 插电式并联混合动力汽车模型预测控制

舒红, 聂天雄, 邓丽君, 乔俊林

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**将动态规划应用于模型预测控制构架中,建立了基于空间域的插电式并联混合动力汽车燃油经济性预测控制数学模型。基于动态规划的插电式混合动力汽车全局优化控制的仿真表明,蓄电池荷电状态(SOC)基本上都是从行驶起点时的最大值逐渐减少到终点时的最小允许值,提出理论 SOC 参考斜率作为模型预测控制 SOC 的参考斜率,并以未来行驶工况中出现的特殊工况为依据对理论 SOC 参考轨迹进行修正。结果表明采用此方法能使模型预测控制策略的控制效果接近全局优化控制策略的计算结果,汽车油耗显著降低。

**关键词:**插电式混合动力;电动汽车;模型预测控制;仿真;动态规划

**中图分类号:**U469.72;TP273.1

**文献标志码:**A

## Model predictive control for a plug-in hybrid electric vehicle

SHU Hong, NIE Tian-xiong, DENG Li-jun, QIAO Jun-lin

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The dynamic programming is applied to model predictive control configuration, and a predictive control mathematics model is established for the fuel economy of plug-in hybrid electric vehicles (HEVs) based on spatial-domain. A global optimal method for plug-in HEVs is studied with dynamic programming, and the results indicate that the state of charge (SOC) is reduced slowly from the maximum at a trip's initiation to the low threshold at the destination. The theoretical SOC slope is proposed to be taken as the reference slope of model predictive control, and the theoretical reference contrail of SOC is modified according to the especial driving modes in future. The results show that the predictive control effect of this method is approached to the calculation result of global optimal and fuel consumption is obviously reduced.

**Key words:** plug-in hybrid system; electric vehicles; model predictive control; simulation; dynamic programming

插电式混合动力电动汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)与传统的混合动力汽车相比配备有更大容量储能装置,能够利用普通电网对储能装置充电,增加了纯电动行驶里程,大大减少了燃油消耗和废气排放<sup>[1]</sup>。PHEV 已经作为许多国家新一代汽车发展计划中实现车辆节能减排的重要技术途径之一。

因插电式混合动力电动汽车具有更高的蓄电池

能量,故要求汽车到达行驶目的地时尽可能多地利用蓄电池的能量。插电式混合动力汽车控制策略一般有两种模式,即荷电消耗模式和荷电保持模式<sup>[2-3]</sup>。Karbowski 和 Sharer 等<sup>[4-5]</sup>对插电式混合动力汽车在不同的行驶循环工况下应用全局最优经济性控制策略的研究表明,“混合控制”模式优于传统的“消耗-保持”模式。在 UDDS 循环工况上行驶 32 km 时,采用“混合控制”模式相比“消耗-保持”模

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61074062)

作者简介:舒红(1963-),女,重庆大学副教授,博士,主要从事混合动力电动汽车控制与仿真的研究。(Tel)023-65102444;(E-mail)shuhong@cqu.edu.cn。

式的汽车燃油经济性提高 9%。Moura 等<sup>[6]</sup>提出在不同类型的循环工况上运用随机动态规划来得到最优能量管理策略,利用建立在行驶循环工况上的马尔可夫模型来预测未来驾驶员需求功率的随机分配,从而求解出插电式混合动力汽车的最优策略。行驶循环工况的仿真表明“混合控制”策略的总能量消耗要比“消耗-保持”策略的少 6.4%。Gong 等<sup>[7-9]</sup>根据 GPS 记录的以往汽车历史交通信息数据,得到汽车未来可能的行驶循环工况,经过动态规划方法仿真,研究表明当汽车到达目的地时蓄电池荷电状态(State of Charge, SOC)刚好降到最低门限值是最优的控制方式。

笔者将动态规划与模型预测控制方法相结合,建立插电式并联混合动力汽车燃油经济性预测控制模型,并将时间域模型转化为空间域模型;为了使模型预测控制能够用于汽车的实时控制,提出 SOC 理论斜率,并利用未来可能出现的特殊工况对理论 SOC 参考轨迹进行修正,从而使预测控制的控制效果逼近全局优化控制策略的结果。

## 1 插电式混合动力系统模型

### 1.1 PHEV 动力传动系统结构

插电式并联混合动力系统结构见图 1,其中发动机和电机之间采用自动离合器相连,汽车具有怠速停,纯电动机驱动,纯发动机驱动,电动机与发动机联合驱动,轻载充电和再生制动工况,动力电池可外接充电,其整车及动力总成参数如表 1 所示。

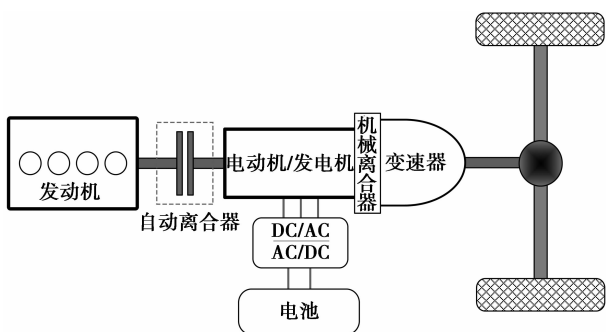


图 1 插电式混合动力汽车结构简图

根据各动力总成部件之间的动力学关系,可以计算得到发动机转矩

$$T_e = (1000P_r/\eta_T - T_m\omega_m)/\omega_e, \quad (1)$$

式中: $\omega_e$  为发动机转速,rad/s; $\omega_m$  为电动机/发电机转速,rad/s; $T_e$  为发动机输出转矩,N·m; $T_m$  为电动机输出转矩或发电机输入转矩,N·m; $\eta_T$  为传动

效率; $P_r$  为车轮需求功率,kW。

表 1 主要部件性能参数

参数	数值
空/满载整车质量 $m/\text{kg}$	1 910/2 175
空气阻力系数 $C_d$	0.32
迎风面积 $A/\text{m}^2$	2.28
滚动阻力系数 $f$	0.013 5
车轮半径 $r/\text{m}$	0.31
主减速器速比 $i_0$	3.85
变速器挡位(5 速 MT)	[3.927 2.722 1.792 1.226 1]
发动机(排量)/L	1.5
最大功率(kW)/转速( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	67/5 400
电机	永磁无刷直流电机
额定功率/kW	20
峰值功率/kW	40
蓄电池	锂离子
容量/(A·h)	30
额定电压/V	360

### 1.2 动态规划数学模型

在汽车循环工况已知的前提下,应用动态规划方法可实现插电式并联混合动力汽车转矩分配的最优控制,为此将电动机/发电机的转矩  $T_m$  取为系统的控制变量。

以汽车循环工况内的总油耗最低为目标建立目标函数如下:

$$J = \min \sum_{t=0}^{T_i-1} v_k(T_m, \omega_m) \Delta t, \quad (2)$$

式中: $v_k(T_m, \omega_m)$  为  $t$  时刻发动机的燃油消耗量加上电能消耗量转化成的等效燃油消耗量, $g; \Delta t$  为优化时间步长, $s; T_i$  为循环工况的总时间。

PHEV 系统的状态变量为蓄电池荷电状态,而 SOC 的改变直接依赖于蓄电池的能量消耗,忽略温度对蓄电池的影响,则系统状态转移方程的具体形式为

$$\begin{cases} \text{SOC}(k+1) = \text{SOC}(k) + \Delta\text{SOC}(k) \\ \Delta\text{SOC}(k) = \frac{P_b(k) \cdot \Delta t}{E} \\ (k = 1, 2, \dots, T_i) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_b(k)$  为第  $k$  阶段的电池充电/放电功率,kW;

充电时  $P_b(k) < 0$ , 放电时  $P_b(k) > 0$ ;  $E$  为电池总能量, kJ。

蓄电池 SOC, 发动机转矩转速, 电动机/发电机转矩转速要满足一定的约束条件, 具体形式参见文献[11]。

## 2 混合动力系统预测控制数学模型

### 2.1 基于时间域的模型预测控制

混合动力汽车模型预测控制是将整个行驶工况的燃油经济性全局最优动态规划问题转化成预测区域内的局部优化问题<sup>[10]</sup>, 并通过滚动优化不断地更新预测视距内汽车未来的运行状态获得优化结果, 实现预测控制在混合动力汽车中的实时控制应用。

在混合动力汽车模型预测控制中<sup>[11]</sup>, 设  $p$  为预测区域,  $q$  为控制区域, 且  $q \leq p$ ;  $x$  为系统的状态变量,  $h$  为系统的控制变量。  $k$  表示当前时刻, 则在预测视距  $p$  内插电式混合动力汽车模型预测控制的状态转移方程为

$$x(k+1) = f(x(k), h(k)), \quad (4)$$

式中:  $f$  为时间离散系统函数;  $x(k)$  为第  $k$  时刻的系统状态变量;  $h(k)$  为第  $k$  时刻的系统控制变量。

在预测区域  $p$  内插电式混合动力汽车以油耗最小的目标函数为

$$J = \min \sum_{t=t_k}^{t_k+t_p} v_k(T_m, n_m) \Delta t, \quad (5)$$

式中:  $t_k$  为当前时刻;  $t_k + t_p$  为时间域预测视距终点时刻。

### 2.2 基于空间域的模型预测控制

式(4)、(5)是以时间为基础建立的数学模型, 但是当遇到道路坡面或者需要预测视距外的某点汽车运行状态时, 以位置为基础更为直观, 并且从 GPS/GIS 获取的信息都是以空间域模型为基础建立的。以位置为基础的模型相比以时间为基础的模型更符合系统实际控制, 要处理这个问题则需要利用位置  $s$  与汽车速度  $u$  之间的关系把基于时间域的数学模型转化为基于空间域的数学模型。

$$\frac{ds}{dt} = u \Rightarrow dt = \frac{1}{u} ds. \quad (6)$$

运用式(6)对式(3)中蓄电池荷电状态 SOC 进行变换, 则有

$$\frac{dSOC}{ds} = \frac{1}{u} \frac{P_b}{E} \quad (u \neq 0). \quad (7)$$

为了实现控制算法, 需要一个以距离  $\Delta s$  为基础的离散模型。由于系统是非线性的, 运用欧拉近似法把基于距离的蓄电池状态变量改写为

$$SOC(s + \Delta s) = SOC(s) + \frac{\Delta s P_b}{uE}. \quad (8)$$

运用式(8)把式(5)转化为空间域的函数, 则在预测区域  $p$  内插电式混合动力汽车模型预测控制的目标函数为

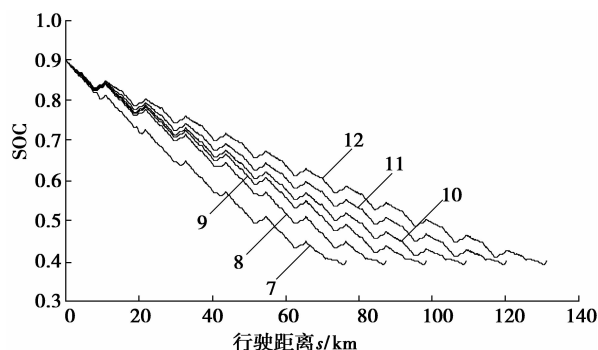
$$J = \min \sum_{\mu=S_k}^{S_k+S_p} \frac{1}{u(\mu)} v_k(T_m, n_m) \Delta s(\mu), \quad (9)$$

式中:  $S_k$  是当前位置;  $S_p$  是预测视距的长度, m。

## 3 插电式混合动力汽车模型预测控制策略

### 3.1 全局优化控制计算结果

采用新欧洲行驶循环工况 (New European Driving Cycle, NEDC) 作为计算工况在不同的行驶里程下对插电式混合动力汽车全局优化的研究结果如图 2 所示。通过重复 NEDC 来实现 PHEV 不同的行驶里程 (图中 NEDC-X 代表重复 NEDC 循环 X 次)。



7. NEDC-7; 8. NEDC-8; 9. NEDC-9;  
10. NEDC-10; 11. NEDC-11; 12. NEDC-12

图 2 插电式混合动力汽车动态规划计算结果

由图 2 可知全局优化控制策略随汽车行驶里程和汽车行驶工况而变化。对于不同的行驶里程虽然蓄电池 SOC 的变化曲线不相同, 但基本上蓄电池 SOC 都是从行驶起点时的最大值逐渐减少到终点时的最小允许值, 即没有出现荷电维持阶段, 并且随着距离的增长 SOC 下降越来越缓慢, 说明随着距离的增长发动机参与工作的频率越来越高。

### 3.2 理论 SOC 参考轨迹

由 3.1 节可知 SOC 的最优轨迹可以通过动态规划获取, 但汽车在实际运行中只有当汽车到达目的地后才能确定出一条完整的行驶工况图。为使预测控制能够用于实时控制, 定义 SOC 理论斜率, 其值为起点和终点时的蓄电池 SOC 之差和行驶里程

的比值。

假设汽车的行驶里程长度已事先预知,蓄电池 SOC 随汽车行驶距离呈线性衰减,如图 3(实线)所示。依据 SOC 理论斜率,整段路程中每个位置  $s$  处的蓄电池 SOC 参考值可由式(10)计算。

$$SOC_r(s) = \lambda \cdot (D_t - s) + SOC_f, \quad (10)$$

式中: $SOC_r$  为在位置  $s$  处的 SOC; $\lambda$  为 SOC 理论斜率; $D_t$  为汽车行驶总里程,  $m$ ;  $SOC_f$  为汽车终点处的 SOC。

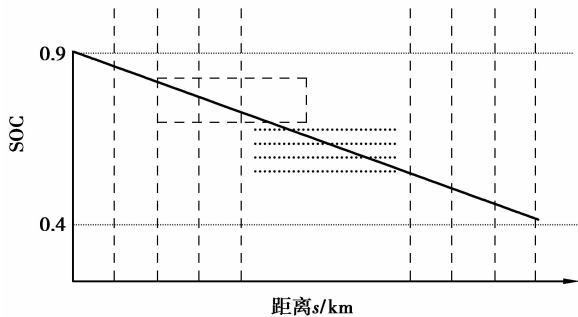


图 3 理论 SOC 参考轨迹

### 3.3 理论 SOC 参考轨迹的修正实时方法

为了使预测控制策略的控制效果逼近全局优化控制策略的计算结果,笔者将汽车未来预测视距内的运行工况分为一般工况和特殊工况分别进行研究,并对理论 SOC 轨迹进行实时修正。

一般工况是指在预测视距内预测到将出现下述工况:平路(含坡度小,坡道短的路面)上的加速、或/和匀速、或/和减速制动、或/和临时停车工况,或/和在坡道短的路面上的匀速或变速下坡制动工况,或/和短里程的塞车工况。特殊工况是指在当前时刻已经检测出汽车正处于下长坡制动工况,或较长里程的塞车工况,或爬长坡工况等。

如图 4 所示为一个预测视距内的 SOC 变化图(图 3 虚线框内部分的放大图),在  $S_{k-1}$  位置的实际蓄电池荷电状态  $SOC(S_{k-1})$  已知,由  $k-1$  位置预测视距内最优电机控制转矩第一个值可计算得到  $k$  位置实际  $SOC(S_k)$ 。在位置  $S_k$  可以预测得到预测视距  $S_p$  内汽车即将出现的运行状态。如果判断未来的运行工况属于一般工况,则以  $SOC(S_k)$  作为初始 SOC 值,以预测视距终点处的参考值  $SOC(S_k + S_p)$  作为末端 SOC 值,在预测视距  $S_p$  内运用动态规划得到最优的 SOC 变化曲线如图 4 细实线所示。

如果判断未来的运行工况属于特殊工况,则需要对预测视距终点的 SOC 参考值进行修正,即对 SOC 理论参考轨迹进行修正。如出现较长里程的

塞车工况、爬长坡工况则需要更多的蓄电池能量,实际 SOC 轨迹较理论 SOC 参考轨迹衰减得要快,此时需要对预测视距末端 SOC 目标值进行修正,以  $SOC(S_k + S_p)$  为参考下调到  $SOC(S_k + S_p)$  处;而对于预测视距内出现的下长坡制动工况,为了尽可能多地回收能量也需要对预测视距末端 SOC 目标值进行修正,以  $SOC(S_k + S_p)$  为参考上调到  $SOC(S_k + S_p)'$  处。因此 SOC 调节量计算公式为

$$\Delta SOC_p = SOC(S_k) - SOC(S_k + S_p) - \sum_{\mu=S_k}^{S_k+S_p} \frac{\Delta s(\mu) \cdot P_b(\mu)}{u(\mu) \cdot E}, \quad (11)$$

式中: $\Delta SOC_p$  为以  $SOC(S_k + S_p)$  为中心的调节量; $SOC(S_k)$  为  $S_k$  处的实际 SOC; $SOC(S_k + S_p)$  为  $S_k + S_p$  处的参考 SOC。当出现较长里程的塞车工况、爬长坡工况按基于规则的控制策略处理,  $P_b > 0$ ; 当出现下长坡制动工况时,采取基于蓄电池-发电机瞬时最大回收再生制动能量的控制策略<sup>[12-13]</sup>,  $P_b < 0$ 。

由动态规划得到最优的 SOC 变化曲线如图 4 细虚线所示。由模型预测控制理论将最优电机控制转矩序列的第一个值作为控制信号发送给电机控制器可得到  $S_{k+1}$  位置的蓄电池荷电状态  $SOC(S_{k+1})$ 。随着汽车的运行,对于每个优化步长,这样的过程不断重复,直到终点。

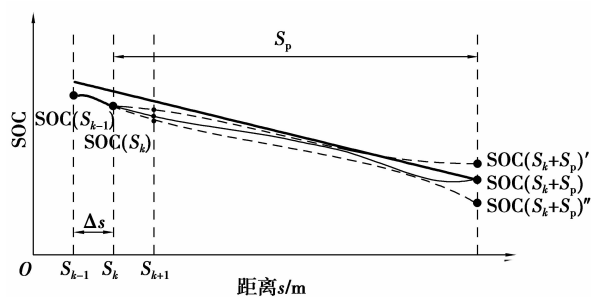


图 4 理论 SOC 参考轨迹的修正方法示意图

## 4 模型预测控制仿真及分析

### 4.1 模型预测控制仿真结果

应用 C 语言与 MATLAB\Simulink 联合开发的插电式并联混合动力汽车模型预测控制仿真程序进行燃油经济性仿真,计算时位置步长  $\Delta s = 10 \text{ m}$ , 汽车行驶工况起始 SOC 为 0.9, 终点 SOC 为 0.4, 预测视距选取 500 m, 选取 NEDC-9 作为汽车行驶工况进行仿真计算,得到的 SOC 变化曲线如图 5 所示。

应用动态规划对整个汽车运行工况进行全局优化得到 SOC 变化曲线见图 5 中 *a* 曲线, SOC 终点值为 0.4, 等效油耗为 5.72 L/(100 km); 利用理论 SOC 参考轨迹作为参考对整个运行工况进行的模型预测控制得到 SOC 变化曲线见图 5 中 *c* 曲线, SOC 终点值为 0.400 8, 等效油耗为 6.28 L/(100 km); 对理论 SOC 参考轨迹进行修正后进行的模型预测控制得到 SOC 变化曲线见图 5 中 *b* 曲线, SOC 终点值为 0.407 9, 等效油耗为 5.9 L/(100 km)。虽然应用理论 SOC 参考轨迹进行的模型预测控制得到的油耗相比全局优化的增加了 9.79%, 但控制系统节省了用动态规划计算需要的大量时间(无法用于实时控制), 从而提高了整个系统的计算效率; 对理论 SOC 参考轨迹进行修正得到的油耗与不进行修正得到的结果相比降低了 6.05%, 说明笔者提出的理论 SOC 参考轨迹修正方法是有效的。图 6、图 7 分别为采用理论 SOC 参考轨迹修正方法后的发动机、电机工作点, 可以看出发动机大部分都工作在其经济区域, 说明对于插电式混合动力汽车, 一旦发动机开启, 大部分都工作在高负荷区, 从而提高了整车的燃油经济性。

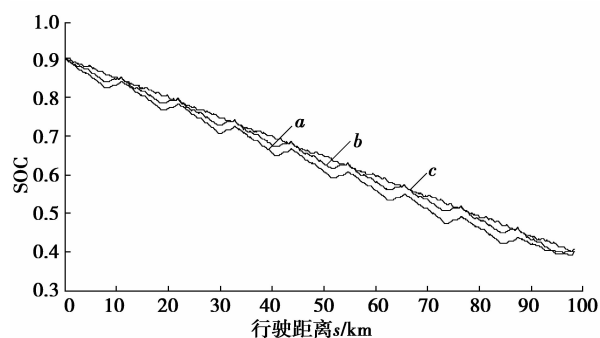


图 5 SOC 变化曲线

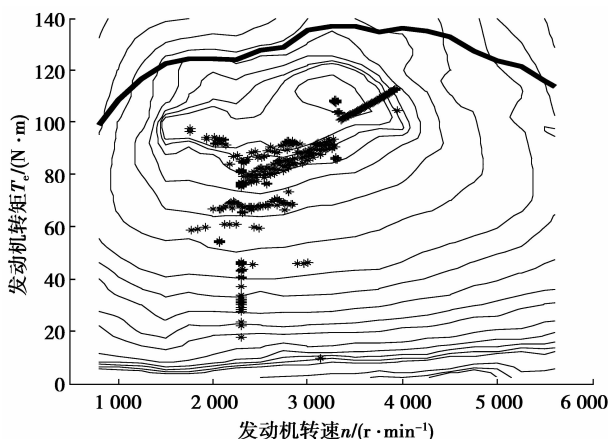


图 6 发动机工作点分布

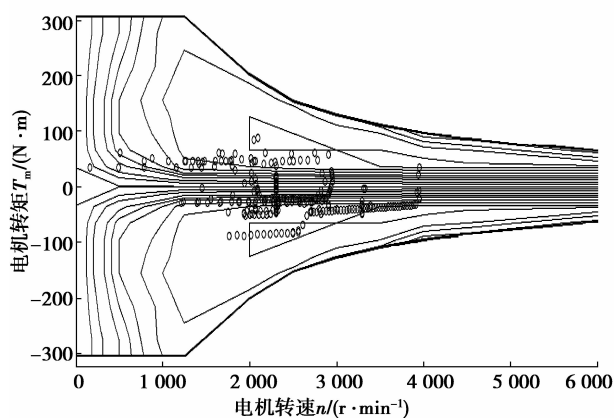


图 7 电机工作点分布

#### 4.2 预测视距的选取

随着汽车未来行驶路线的预测视距增加, 能够获得更多的汽车未来运行状态, 汽车的节油效果会提高, 但当预测视距增大到一定的距离后, 预测控制计算效率变得很低<sup>[14]</sup>, 因此需选取适当的预测视距使计算时间和燃油经济性得到很好的平衡。笔者选取  $\Delta s=10$  m, 起始 SOC 为 0.9, 终点 SOC 为 0.4, 选取 NEDC-9 作为汽车行驶工况进行仿真计算, 选取的预测视距的长度与计算时间、油耗的关系见表 2。

表 2 预测视距与计算时间、油耗的关系

预测视距 $S_p$ /m	仿真时间 $T_a$ /s	等效油耗 $Q_e$ (L/100 km)
200	2 052	6.032 7
300	3 121	5.957 2
400	4 257	5.944 7
500	5 592	5.904 8
600	6 834	5.870 3
700	8 441	5.810 3
800	10 032	5.766 2
900	12 649	5.770 3
1 000	13 964	5.787 9

由表 2 可知, 随着预测视距的增加, 计算时间迅速增加, 等效油耗却逐渐减少。这是因为随着预测视距的增加, 汽车能够获得更多的未来交通信息, 并能更早地对未来可能出现的特殊工况进行修正, 从而能够得到更精确的控制输出。当预测视距超过 800 m 以后, 等效油耗稍微增大, 这是因为在用动态规划对其进行计算时插值误差的积累造成的。综合考虑燃油经济性和计算时间的关系, 笔者选取预测视距的长度为 500 m, 则平均每个优化步长仿真时

间为 0.568 5 s。

## 5 结 语

笔者将动态规划与模型预测控制方法相结合,建立了插电式并联混合动力汽车燃油经济性预测控制数学模型,并把基于时间域的预测控制数学模型转化为基于空间域的数学模型。为了提高算法的计算效率,提出 SOC 理论斜率,以此作为整个行驶工况的宏观参考 SOC,并确定了预算视距的合理长度。对理论 SOC 参考轨迹进行修正得到的控制结果与未对理论 SOC 参考轨迹修正得到的控制结果相比油耗有显著的减少,而与全局优化控制结果比较,油耗仅略微上升,但计算效率大幅提高,说明此方法是有效及可行的。

### 参考文献:

- [1] SAMARAS C, MEISTERLING K. Life Cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(9): 3170-3176.
- [2] GONDER J, MARKEL T. Energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles[C]//2007 World Congress, April16-19, 2007, Detroit, Michigan. [S.l.]:SAE International, 2007.
- [3] AXSEN J, KURANI K S. The early U. S. market for PHEVs: anticipating consumer awareness, recharge potential, design priorities and energy impacts [R]. Davis; Institute of Transportation Studies University of California, 2008.
- [4] KARBOWSKI D, ROUSSEAU A, PAGERIT S, et al. Plug-in vehicle control strategy: from global optimization to real time application [C/OL] // 22th International Electric Vehicle Symposium, EVS22, Yokohama, Japan, October23-28, 2006; <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/435.pdf>.
- [5] SHARER P, ROUDDEAU A, KARBOWSKI D, et al. Plug-in hybrid electric vehicle control strategy: comparison between EV and charge-depleting options [C]//SAE World Congress and Exhibition, April14-18, 2008. [S.l.]: SAE International, 2008.
- [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 Transaction on Control System Technology*, 2010, 18(6):1-11.
- [7] GONG Q, LI Y, PENG Z R. Trip based power management of plug-in hybrid electric vehicle with two-scale dynamic programming [C/OL] // Proceedings of 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPP) Conference, Arlington, TX, September9-12, 2007; [2008-06-17]. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4544089>.
- [8] GONG Q, LI Y, PENG Z R. Optimal power management of plug-in hybrid electric vehicle with intelligent transportation systems [C/OL] // 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich, September 4-7, 2007; [2007-12-26]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4412579](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4412579).
- [9] GONG Q, LI Y, PENG Z R. Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(6):3393-3401.
- [10] BACK M, SIMONS M, KIRSCHAUM F, et al. Predictive control of drivetrains [C] // 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, July21-26, 2002, Barcelona, Spain. London:Elsevier IFAC, 2003:241-246.
- [11] 舒红,蒋勇,高银平. 中度混合动力汽车的模型预测控制[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(1):36-41.
- SHU HONG, JIANG YONG, GAO YIN-PING. Model predictive control of moderate hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(1): 36-41.
- [12] 舒红,袁景敏,胡明辉,等. 中度混合动力汽车匀速下坡再生制动策略优化[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(9): 965-970.
- SHU HONG, YUAN JING-MIN, HU MING-HUI, et al. Optimized regenerative braking strategy for a medium hybrid electric vehicle cruising downhill [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(9):965-970.
- [13] 舒红,高银平,杨为,等. 中度混合动力汽车燃油经济性预测控制研究[J]. *公路交通科技*, 2009, 26(1): 149-153.
- SHU HONG, GAO YIN-PING, YANG WEI, et al. Study on predictive control of fuel economy for medium HEV [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(1):149-153.
- [14] BECK R, BOLLIG A, ABEL D. Comparison of two real time predictive strategies for the optimal energy management of a hybrid electric vehicle[J]. *Oil and Gas Science and Technology*, 2007, 62(4):635-643.