

文章编号:1000-582X(2010)01-0036-06

## 中度混合动力汽车模型预测控制策略

舒红, 蒋勇, 高银平

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**基于车载导航系统(GPS/GIS)建立汽车未来一段行驶路线上的汽车运行状态模型,将模型预测控制与动态规划相结合,提出了中度混合动力汽车实时在线滚动优化控制策略;并就如何减少动态规划计算量及系统变量离散化问题进行了研究;建立了中度混合动力汽车燃油经济性预测控制仿真模型,采用 C 语言与 MTALAB\Simulink 进行联合仿真,验证了所设计的模型预测控制算法可以满足实时控制的要求,且采用该预测控制策略的中度混合动力汽车具有显著的节油效果。

**关键词:**混合动力汽车;模型预测控制;动态规划;仿真

**中图分类号:** U469.72;TP273.1

**文献标志码:** A

### Model predictive control strategy of a medium hybrid electric vehicle

SHU Hong, JIANG Yong, GAO Yin-ping

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

**Abstract:** Combining model predictive control with dynamic programming, a real-time on-line receding horizon optimal control strategy for medium hybrid electric vehicles is proposed, which based on the driving states of vehicles built by GPS/GIS on board in the future predictive route. The problem of how to reduce the dynamic programming computation and the system variable quantization are studied. The simulation model of predictive control for the fuel economy of the medium hybrid electric vehicles is built. It is verified by the simulation combining C code with MTALAB\Simulink, that the predictive control algorithm could meet the need of the real-time control of hybrid electric vehicles, and the fuel economy is increased remarkable compared with the foundational vehicles.

**Key words:** hybrid electric vehicle; model predictive control; dynamic programming; simulation

国内外的混合动力汽车控制策略绝大多数是根据汽车当前时刻的驾驶员功率需求、车速和蓄电池荷电状态(State of Charge, SOC)所确定的,无法将混合动力汽车的低油耗低排放潜力充分发挥出来。而借助车载全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)和智能交通系统(ITS)可获取汽车在未来一

段预测路线上的道路交通信息,如指定路段的平均车速、路面层高、路口信号灯的起/停状态和路面车速限制等,由此便可以预测未来一段路线上的驾驶员驱动和制动功率需求。从而使混合动力汽车可以利用预测控制策略,最大程度地降低混合动力汽车的油耗和排放<sup>[1]</sup>。例如如果提前预测到汽车几分钟

收稿日期:2009-08-16

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2007BB0116)

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仿真与控制研究,(Tel)023-65102444;  
(E-mail)shuhong@cqu.edu.cn。

后将下一个长坡,则此时可以让蓄电池放电,使蓄电池在汽车下长坡时能充分回收汽车的再生制动能量。又例如如果预测到汽车将要进入一段比较长的塞车路段,则提前给蓄电池充电,以便汽车进入塞车工况后能保持足够长时间的纯电动机运行,减少汽车的油耗和排放。

Johannesson 等<sup>[2]</sup>利用随机动态规划设计了不依赖于位置的和依赖于位置的控制策略,研究表明基于 GPS/GIS 的预测控制策略能大幅度提高汽车城市运行工况的燃油经济性。Koot 等<sup>[3]</sup>将最优控制模型简化为二次规划结构,将动态规划和二次规划优化用于模型预测控制构架中,设计了实时在线控制策略。Beck<sup>[4]</sup>等将非线性的准静态混合动力系统模型进行简化,使原先的非线性优化问题简化为可用 MI-QCLP(混合整数二次约束线性规划)和自适应当量策略求解,缩短了运算时间。但与动态规划法比较,采用 MI-QCLP 策略和自适应当量策略的汽车油耗略高。Back 等<sup>[5]</sup>提出以模型预测控制为框架结合动态规划法,以混合动力汽车燃油消耗最小为目标实现了次全局优化。Rajagopalan 等<sup>[6]</sup>提出基于模糊控制理论的混合动力汽车预测控制策略。

目前混合动力汽车预测控制的主要问题是解决预测距离较长时油耗减少,但运算速度慢无法用于汽车实时控制的矛盾问题。笔者将模型预测控制与动态规划相结合,建立了中度混合动力汽车的燃油经济性预测控制计算模型,并进行了仿真研究。

## 1 混合动力汽车模型预测控制原理

在预测控制研究中,需要知道汽车未来一段行驶路线上的汽车运行状态。汽车的运行状态包括未来一段路线上的预测车速,加/减速度,坡度和坡长等。借助车载导航系统(如 GPS/GIS 等)可以获得汽车未来一段路线的汽车车速和路面层高图<sup>[7]</sup>。

混合动力汽车的预测控制是以模型预测控制为框架结合动态规划实现的在线滚动优化控制。模型预测控制如图 1 所示<sup>[5]</sup>, $p$  为预测区域, $q$  为控制区域,且  $q \leq p$ ;  $x$  为系统的状态变量, $u$  为系统的控制变量。

将中度混合动力汽车系统的状态变量取为蓄电池荷电状态,系统的控制变量取为电动机/发电机的控制转矩,当混合动力汽车以时间离散状态空间建立模型时

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

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; $u(k)$  为第  $k$  时刻的系统控制变量。

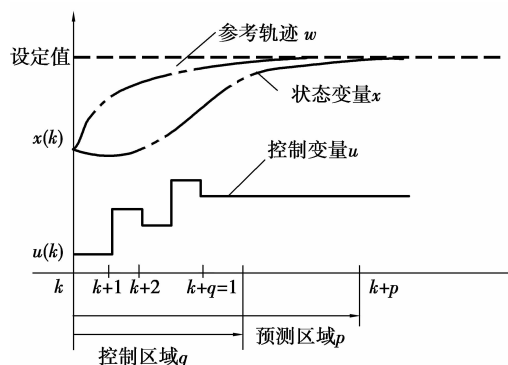


图 1 模型预测控制原理

在预测区域  $p$  内混合动力汽车以油耗最小的价值函数为

$$J = \min_{\mu=k}^{\mu=k+p} \sum L(x(\mu), u(\mu)), \quad (2)$$

式中  $L$  为阶段油耗价值函数。

模型预测控制基本运算法描述为下面几个步骤：

1) 当汽车行驶在第  $k$  秒时,由当前时刻的蓄电池的 SOC 值、电动机可能的最大转矩和发电机可能的最大转矩计算得到  $k+1$  秒时 SOC 的最大、最小值<sup>[7]</sup>,以此类推计算得到在  $k+p$  区域内 SOC 的最大最小轨迹曲线,即是 SOC 的可达区域。

2) 由式(1)和式(2)采用动态规划算法求解最优优化问题,得到在预测区域  $k+p$  内使油耗最小的电动机控制转矩序列

$$[u(k+1), u(k+2), \dots, u(k+p)].$$

3) 将最优电机控制转矩序列的第一个值  $u(k+1)$  作为  $k+1$  秒的控制信号发送给电机控制器<sup>[8]</sup>,因此实际控制区域  $q$  只有未来 1 s。

4) 回到 1),进入  $k+1$  秒,重复上述计算过程。

综上所述,以模型预测控制为框架结合动态规划的最优控制算法在  $k$  时刻只计算未来  $k+p$  区域内的电动机/发电机最优转矩值,到  $k+1$  时刻计算  $k+1+p$  区域的电动机/发电机最优转矩值,如此预测区域向前滚动。这样每次计算区域远远小于整个行驶区域,大大降低了动态规划的计算量,实现了动态规划的实时在线控制,即预测控制。

## 2 最优化控制算法

### 2.1 建立动态规划方程

动态规划法适合求解有约束的非线性最优化问题<sup>[9]</sup>,能够很容易地应用到非线性模型预测控制算法中求解最优化问题。

研究对象是采用起动机/发电机/电动机一体化

技术的中度并联型混合动力汽车,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功能。汽车行驶时,电机既可以作为电动机运行输出能量,也可以作为发电机运行给电池充电。其能量流动如图 2 所示。

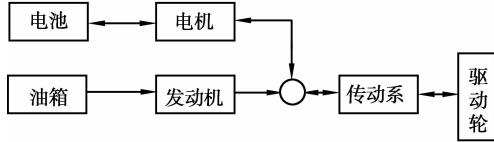


图 2 驱动工况能量流程图

发动机转速、发电机/电动机的转速与车轮的转速关系为

$$n_e = n_m = i_g i_0 n_w, \quad (3)$$

式中:  $n_e$  为发动机的转速, rad/s;  $n_m$  为电动机/发电机的转速, rad/s;  $n_w$  为车轮的转速, rad/s;  $i_g$  为变速器速比;  $i_0$  为主减速器速比。

当发动机与电机之间的自动离合器处于闭合状态时,发动机、发电机/电动机的转速,转矩与车轮需求功率关系为

$$(T_e n_e / 1000 + T_m n_m / 1000) \eta_T = P_r, \quad (4)$$

式中:  $T_e$  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。

由式(4)得发动机转矩

$$T_e = (1000 P_r / \eta_T - T_m n_m) / n_e. \quad (5)$$

忽略温度对电池的影响,蓄电池荷电状态的计算模型为

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \Delta \text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{P_b \Delta t}{E}, \quad (6)$$

式中:  $\text{SOC}_0$  为蓄电池 SOC 的初始值;  $P_b$  为电池充电/放电功率, kW, 充电时  $P_b < 0$ , 放电时  $P_b > 0$ ;  $\Delta t$  为油耗时间步长, s;  $E$  为电池总能量, kJ。

将动态规划与模型预测控制相结合,则式(1)是系统的状态转移方程,具体形式为

$$\text{SOC}(k+1) = \text{SOC}(k) + \Delta \text{SOC}(k), \quad (7)$$

$$(k = 1, 2, \dots, p).$$

当蓄电池向电动机放电时有

$$\Delta \text{SOC}(k) = \frac{P_b(k) \Delta t}{E} = \frac{P_m(k) \Delta t}{\eta_{bd} \eta_m E}, \quad (8)$$

式中:  $P_m$  为电动机功率, kW,  $P_m > 0$ ;  $\eta_{bd}$  为蓄电池放电效率;  $\eta_m$  为电动机效率。

当发电机向蓄电池充电时有

$$\Delta \text{SOC}(k) = \frac{P_b(k) \Delta t}{E} = \frac{P_g(k) \eta_{bc} \eta_g \Delta t}{E}, \quad (9)$$

式中:  $P_g$  为发电机功率, kW,  $P_g < 0$ ;  $\eta_{bc}$  为蓄电池充电效率;  $\eta_g$  为发电机效率;  $\Delta t$  为离散时间,  $\Delta t = 1$  s。

系统阶段指标函数定义为在  $\Delta t$  时间内的燃油消耗量。其中放电工况的汽车燃油消耗量为发动机的燃油消耗量加上蓄电池向电动机放电所消耗的等效燃油消耗量,即

$$v_k(T_m, n_m) = \frac{1}{3600} [P_e(k) b_e(k) + \frac{P_m(k) \bar{b}_e(k)}{\eta_{bd} \eta_m}] \cdot \Delta t, \quad (10)$$

式中:  $v_k$  为燃油消耗量, g;  $P_e$  为发动机功率, kW;  $b_e$  为发动机燃油消耗率, g/(kW·h);  $\bar{b}_e$  为蓄电池简化为等效油箱,电动机简化为等效发动机时的平均燃油消耗率, g/(kW·h)。

充电工况的汽车燃油消耗量是发动机的实际燃油消耗量减去发动机富裕功率通过发电机向蓄电池充电所贮存的等效燃油量,即

$$v_k(T_m, n_m) = \frac{1}{3600} [P_e(k) b_e(k) + P_g(k) \eta_{bc} \eta_g b_e(k)] \Delta t. \quad (11)$$

制动时,电机作为发电机运行,向蓄电池充电回收再生制动能量,此时发动机关闭,燃油供给切断。汽车制动时,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。制动阶段指标函数  $v_k(T_m, n_m)$  为零。另外,汽车怠速停车时阶段指标函数也为零,即

$$v_k(T_m, n_m) = 0. \quad (12)$$

根据 Bellman 最优化原理,以有限区域  $p$  内油耗最低为目标建立价值函数,由式(2)得

$$J = \min \sum_{\mu=k}^{\mu=k+p} v_k(T_m, n_m). \quad (13)$$

蓄电池 SOC、发动机转矩转速、电动机/发电机转矩转速要满足以下的约束方程

$$\left. \begin{aligned} \text{SOC}_{\min}(k) &\leq \text{SOC}(k) \leq \text{SOC}_{\max}(k), \\ T_{e_{\min}}(k) &\leq T_e(k) \leq T_{e_{\max}}(k), \\ n_{e_{\min}}(k) &\leq n_e(k) \leq n_{e_{\max}}(k), \\ T_{m_{\min}}(k) &\leq T_m(k) \leq T_{m_{\max}}(k), \\ n_{m_{\min}}(k) &\leq n_m(k) \leq n_{m_{\max}}(k). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中:  $\text{SOC}_{\min}$ 、 $\text{SOC}_{\max}$  为 SOC 的最小、最大值,  $T_{e_{\min}}$ 、 $T_{e_{\max}}$  为发动机转矩的最小、最大值, N·m;  $n_{e_{\min}}$ 、 $n_{e_{\max}}$  为发动机转速的最小、最大值, rad/s;  $T_{m_{\min}}$ 、 $T_{m_{\max}}$  为电动机/发电机转矩的最小、最大值, N·m;  $n_{m_{\min}}$ 、 $n_{m_{\max}}$  为电动机/发电机转速的最小、最大值, rad/s。

根据式(7)-(14),用动态规划逆序算法就可计算得到在预测区域  $p$  内以混合动力汽车油耗最低为

目标的最优电动机/发电机转矩序列。

## 2.2 动态规划计算效率

随着汽车未来行驶路线的预测视距增加,混合动力汽车的节油效果会提高,但当预测视距增大到1 000 m后,预测控制计算效率变得很低<sup>[5]</sup>。因此提高动态规划的计算效率,使之能用于混合动力汽车的实时控制,是模型预测控制需要重点解决的问题。为了提高动态规划在混合动力系统中的计算效率,笔者采用了以下几种方法:

1) 动态规划程序大多采用 MATLAB 语言编写,然而 MATLAB 语言属于解释性语言,对于循环程序其计算效率相当不理想,而采用 C 程序代码可以大大提高程序的计算效率。经过实际算例证明,由 C 语言编写的基于 NEDC 工况的混合动力汽车全局优化控制的动态规划程序计算效率比 MATLAB 语言编写的提高了 97.77%。因此采用 C 语言编写整个混合动力汽车模型预测控制程序,再利用 MATLAB 的 C-MEX 外部接口文件<sup>[10]</sup>进行 C 语言与 MATLAB\Simulink 联合仿真。

2) 由于当前时刻的蓄电池 SOC 值和汽车未来一段路线上的行驶状态是已知的,那么就可以计算得到每个阶段电动机可能的最大输出转矩以及发电机可能的最大充电转矩,从而得到蓄电池 SOC 的可达域集合。根据同样的原理,反过来就可以得到在每一个时刻下,每一个 SOC 值的电动机/发电机转矩的可达域集合<sup>[7]</sup>。这样就减小了系统的状态变量和控制变量的取值范围,大大地降低了计算量。

3) 储存在整个预测区域的最优控制序列需要占用大量的内存,但是由于是滚动控制所以实际只有第一个控制变量作为控制信号,所以只保存第一个控制变量。

## 3 系统变量离散量化

混合动力汽车蓄电池 SOC 的量化以及电动机/发电机转矩的量化不仅影响在线计算的效率也影响整车油耗大小。一般地离散量化点数越多则油耗越低,但其计算效率也会随之降低。Finkeldei 等<sup>[11]</sup>在样车道路试验中要求中央控制器每一秒给出电机最优转矩的控制值,但对于动力传动系统则要求每 100 ms 给出控制信号,于是设置在 1 s 内将最优控制信号反复发送给动力传动系统各控制器。笔者参照该设置,要求预测控制算法在 1 s 内给出电机最优控制转矩,因此需要找到一个合适的蓄电池 SOC 和电动机/发电机转矩的量化值来满足实时控制的要求。分别选取不同的蓄电池 SOC 和电动机/发电

机转矩的离散量化值,进行预测控制的仿真计算,得到相应的计算时间及油耗,结果见图 3、4。其中计算工况为 NEDC 工况,因为预测视距<sup>[12]</sup>取为 60 s,所以选取新欧洲行驶循环工况(NEDC)中当前时刻之后的 60 个工况点作为预测区域 60 s 对应的汽车行驶状态。

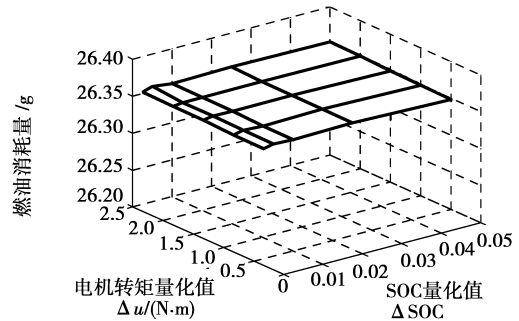


图3 不同系统变量量化值下的油耗

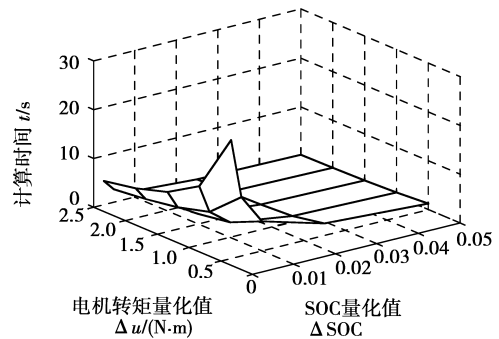


图4 不同系统变量量化值下的计算时间

由图 3、4 可知,随着蓄电池 SOC 量化值和电动机/发电机转矩的量化值减小,计算时间会逐渐增加,油耗基本上也会减小;可看出虽然  $\Delta SOC$  从 0.002 5、0.005 0、0.010 0、0.025 0 变化到 0.050 0,  $\Delta u$  从 0.5、1.0、1.5、2.0 变化到 2.5,但是油耗值变化不大,主要在 26.346~26.358 g 变化,而计算时间则变化幅度很大,主要在 0.20~25 s 变化。当 SOC 的离散量化值  $\Delta SOC$  为 0.05,电动机/发电机转矩离散量化值  $\Delta u$  为 2.5 N·m 时,油耗为 26.351 g,计算时间为 0.272 3 s;当  $\Delta SOC$  为 0.002 5,  $\Delta u$  为 0.5 N·m 时,油耗为 26.347 g,计算时间为 24.207 s,这前后 2 种计算情形相比较,油耗仅降低了 0.017%,但计算时间却增加了 88 倍。因此在满足实时控制的前提下,系统变量的离散量化值对计算效率的影响更显著,所以以计算时间为衡量标准选取蓄电池 SOC 和电动机/发电机转矩的离散量化值,分别为  $\Delta SOC=0.025$ ,  $\Delta u=1.5$ ,这样在预测控制区间内每次计算时间为 0.828 s,能满足实

时控制的要求。

### 4 预测控制仿真实例

用 C 语言编写的 S 函数可以通过 MATLAB 编译成 MEX 文件,被动态地链接到 MATLAB\Simulink 中进行计算,这就可以实现 C 语言与 MATLAB\Simulink 的联合仿真。于是用 C 语言编写预测控制算法的 S 函数进行仿真,将汽车未来的行驶状态作为预测控制算法 S 函数的输入,输出为最优电动机/发电机控制转矩、油耗以及 SOC 等。由于暂时还没有实测的汽车未来运行状态的数据,故选取 NEDC 工况作为计算工况进行仿真。

中度混合动力汽车主要参数为:整备质量  $m_0 = 147.5 \text{ kg}$ ,满载质量  $m = 2000 \text{ kg}$ ,空气阻力系数  $C_D = 0.32$ ,迎风面积  $A = 2.28 \text{ m}^2$ ,主减速比  $i_0 = 4.38$ ,车轮滚动半径  $R_r = 0.31 \text{ m}$ ,滚动阻力系数  $f = 0.0135$ ,质心高度  $h_g = 0.66 \text{ m}$ ,轴距  $L = 2.6 \text{ m}$ 。电喷发动机 J1475Q1,排量 1.6 L,额定功率 67 kW,最高转速 6000 r/min。电机永磁无刷直流电机,额定功率 25 kW,峰值功率 33 kW,最高转速 6000 r/min。动力电池为镍氢电池,额定容量 6.5 A·h,额定电压 288 V。发动机油耗数值模型及电机效率见图 5、6。

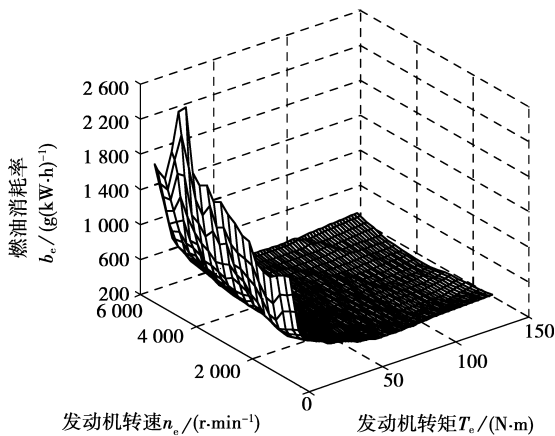


图 5 发动机三维油耗图

因为笔者研究的是基于车载导航系统的混合动力汽车预测控制策略,所以在整个循环工况的起始和终了时的 SOC 并不要求保持平衡。考虑到整车燃油经济性和再生制动能量回收效率,根据镍氢电池的充放电效率,设定驱动工况时,电池 SOC 的最低值为 0.4,最高值为 0.8;再生制动工况时,蓄电池 SOC 的最高允许值为 0.97。取 SOC 的初始值为 0.7,预测视距为未来 60 s 进行仿真计算,结果如图 7 所示。

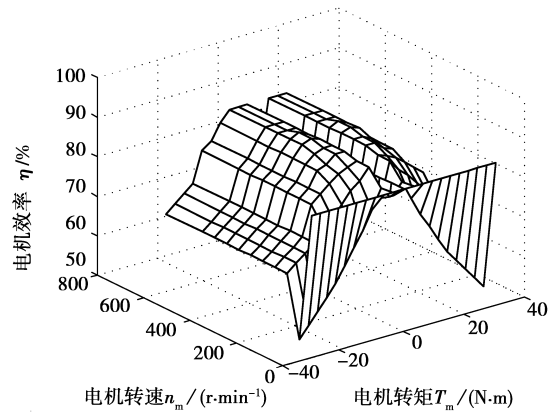


图 6 电机三维效率图

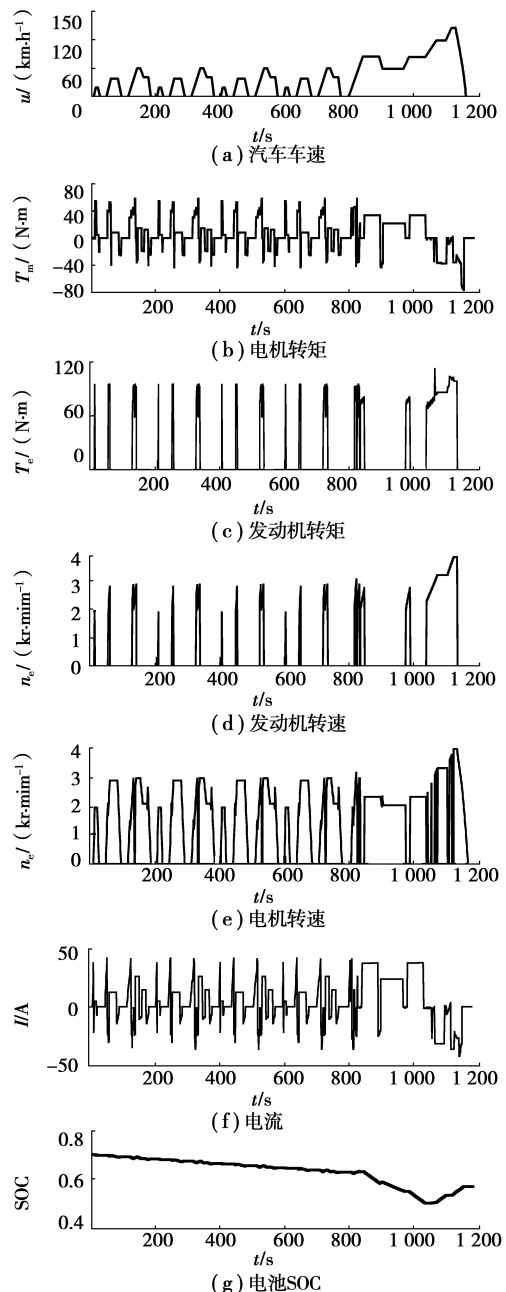


图 7 NEDC 工况计算结果图

整个循环的燃油消耗量为 486.445 g,循环工况终了时的 SOC 为 0.569,百公里油耗为 5.871 L/100 km。将结束时的 SOC 换算为初始的 SOC,即把汽车在循环工况起始和结束时的蓄电池能量变化量折算为燃油消耗量,得到等效百公里油耗为 5.950 L/100 km。与传统的基础车型在 NEDC 工况的油耗 8.564 L/100 km 相比,燃油消耗降低了 30.53%,表明采用该预测控制策略的中度混合动力汽车具有显著的节油效果。

## 5 结 语

笔者建立了混合动力汽车模型预测控制计算模型,研究了将模型预测控制与动态规划相结合的在线滚动油耗预测控制策略,提高了动态规划算法的在线计算效率。应用 MATLAB 外部接口技术,采用 C 语言与 MATLAB/Simulink 实现了以混合动力汽车燃油经济性为优化控制目标的预测控制仿真计算。仿真结果表明,采用该预测控制策略的中度混合动力汽车具有显著的节油效果,且所设计的预测控制策略可以满足实时控制的需要。

### 参考文献:

- [1] SCIARRETTA A, GUZZELLA L. Control of hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 27(2): 60-70.
- [2] JOHANNESSON L, ÅSBOGÅRD M, EGARDT B. Assessing the potential of predictive control for hybrid vehicle powertrains using stochastic dynamic programming[C]//Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System, Sept. 13-16, 2005, Vienna, Austria. [S. l.]: IEEE, 2005: 366-371.
- [3] KOOT M, KESSELS J T B A, DE JAGER B, et al. Energy management strategies for vehicular electric power systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 771-782.
- [4] 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.
- [5] BACK M, SIMONS M, KIRSCHAUM F, et al. Predictive control of drivetrains [C]// 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, July 21-26, 2002, Barcelona, Spain. London: Elsevier IFAC, c2003: 241-246.
- [6] RAJAGOPALAN A, WASHINGTON G. Intelligent control of hybrid electric vehicles using GPS information[C/OL]// SAE Future Car Congress 2002, June 3-5, 2002, Arlington, Virginia, USA. SAE publications, c2003. aspx // http: WWW. sae. org/technical/papers/2002-01-1936.
- [7] 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. A study on the predictive control of fuel economy for a medium HEV [J]. Highway Transportation Technology, 2009, 26(1): 149-153.
- [8] FINDEISEN R, ALLGOWER F. An introduction to nonlinear model predictive control [C]// 21st Benelux Meeting on Systems and Control, March 19-21, 2002, Veldhoven, Netherland. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, c2002: 119-141.
- [9] 张润琦. 动态规划 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989.
- [10] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [11] FINKELDEI E, BACK M. Implementing an mpc algorithm in a vehicle with a hybrid powertrain using telematics as a sensor for powertrain control [C]// Proceedings of the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, April 19-23, 2004, Salerno, Italy. London: Elsevier Science & Technology, c2005: 433-438.
- [12] BACK M, TERWEN S, KREBS V. Predictive powertrain control for hybrid electric vehicles [C]// Proceeding of the IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, April 19-23, 2004, Salerno, Italy. London: Elsevier Science & Technology, c2005: 121-126.

(编辑 张 革)