

基于工况识别的混合动力汽车动态能量管理策略

秦大同¹ 彭志远² 刘永刚¹ 段志辉³ 杨 阳¹

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400044

2. 长安福特汽车有限公司, 重庆, 401120

3. 重庆长安新能源汽车有限公司, 重庆, 401120

摘要: 针对固定循环工况下所制定的混合动力汽车能量管理策略存在一定局限性问题, 从 ADVISOR 软件中选取覆盖车辆实际行驶工况的 20 个典型循环工况, 以整车综合燃油消耗和动力电池寿命为综合优化目标, 利用粒子群算法对各工况下能量管理策略中所涉及的关键参数进行了优化, 并将得到的优化结果建立数据库, 提出了基于行驶工况识别的混合动力汽车动态能量管理策略。最后, 通过选择某个随机工况对所制定的能量管理策略进行仿真。结果表明: 所制定的动态能量管理策略与未采用工况识别的能量管理策略相比, 车辆综合燃油消耗下降 10.70%, 动力电池温升和平均有效工作电流分别下降 2.46 °C 和 1.63 A。

关键词: 混合动力汽车; 工况识别; 随机工况; 动态能量管理策略

中图分类号: U469.7

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.11.024

Dynamic Energy Management Strategy of HEV Based on Driving Pattern Recognition

Qin Datong¹ Peng Zhiyuan² Liu Yonggang¹ Duan Zhihui³ Yang Yang¹

1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044

2. Chang'an Ford Automobile Co., Ltd., Chongqing, 401120

3. Chongqing Chang'an New Energy Vehicle Ltd., Chongqing, 401120

Abstract: Energy management strategy of HEV which was built in invariable cycle condition existed some limitations. 20 typical cycle conditions which stood for vehicle real driving conditions were chosen from ADVISOR software and key control parameters of each driving cycle were optimized by using particle swarm algorithm as the comprehensive goal of vehicle total fuel consumption and power battery life, relevant optimized results were saved in database, an energy management strategy of HEV based on driving pattern recognition was proposed. Finally, simulation for the energy management strategy was carried out under a random driving condition, simulation results show that vehicle fuel consumption is cut down 10.70%, temperature rise and average operation current are cut down 2.46 °C and 1.63 A respectively by using dynamic energy management strategy compared with energy management strategy without driving pattern recognition.

Key words: hybrid electric vehicle(HEV); driving pattern recognition; random driving condition; dynamic energy management strategy

0 引言

目前混合动力汽车能量管理策略主要有: 基于规则的逻辑门限控制策略^[1]、瞬时优化控制策略^[2]、全局最优化控制策略^[3]以及智能控制策略^[4]。但以上能量管理策略绝大部分都是在对固定循环工况进行分析的基础上获得的。车辆实际运行工况是一个随机的、不确定的过程, 某一特定循环工况下能量管理策略的优化效果在实际工况的适应性方面存在一定局限性^[5]。因此, 混合动力汽车能量管理策略的设计必须在充分研究车辆实际行驶工况的基础上才能获得较好的控制

效果。

本文首先在 ADVISOR 软件中选取 20 个典型循环工况, 以整车燃油消耗和动力电池使用寿命联合最优为目标, 利用粒子群算法分别对 20 个典型循环工况下的能量管理策略中所涉及的关键参数进行优化并建立数据库, 然后利用模式识别方法对某个随机工况进行“模块化”识别, 最后在 MATLAB/Simulink 环境下对所提出的基于行驶工况识别的混合动力汽车动态能量管理策略进行仿真分析。

1 典型循环工况特征参数提取

由于车辆行驶道路包含了多种不同的交通特征, 故对车辆实际行驶工况的调查与分析过程比较复杂。本文从 ADVISOR 软件中提取 20 种涵

收稿日期: 2013-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305468); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CDJZR12110005); 机械传动国家重点实验室 2012 年度开放基金资助项目

盖各种交通特征的典型循环工况(工况 1 为 JPN1015、工况 2 为 ARTERIAL、工况 3 为 CBD14、工况 4 为 CBDTRUCK、工况 5 为 COMMUTER、工况 6 为 ECE_EUDC、工况 7 为 HL07、工况 8 为 LA92、工况 9 为 MANHATTAN、工况 10 为 NYCC、工况 11 为 NYCCOMP、工况 12 为 NYCTRUCK、工况 13 为 NurembergR36、工况 14 为 REP05、工况 15 为 SC03、工况 16 为 UDDS、工况 17 为 UDDSHDV、工况 18 为 US06_HWY、工况 19 为 WVUCITY、工况 20 为 WVUSUB),综合考虑循环工况中车辆的运动特征,选取工况时间、行驶距离、最大车速、平均车速、最大加速度、最大减速度、平均加速度、平均减速度、停车时间以及停车次数共 10 个特征参数。

2 控制参数优化及数据库建立

文献[6]制定的工作模式切换规律和电池充放电系数是在固定工况下优化获得的。当车辆行驶工况发生变化时,通过固定工况优化获得的相关控制参数,很难保证车辆综合油耗、电池使用寿命以及电池 SOC 维持等性能方面的优势。本文通过混合动力汽车动力传动系统效率优化得到驱动工况下工作模式的切换规律,如图 1 所示,可以看出,整车驱动工况下不同工作模式区域可由 a、b、c、d、e、f 6 个状态点进行划分。针对车辆所处的不同行驶工况,适时调整这 6 个状态点的位置以及镍氢动力电池充放电功率是整车能量管理策略动态优化的关键。为此,针对前面选出的 20 个典型车辆行驶工况,本文利用粒子群优化算法分别对这 20 个典型循环工况条件下的整车能量管理策略中所涉及的关键控制参数进行优化,以期为该混合动力汽车动态能量管理策略的优化提供支持。

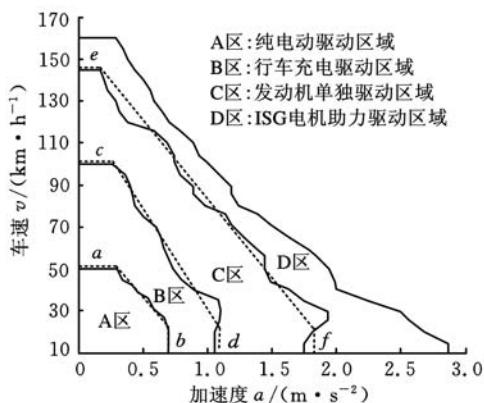


图 1 驱动工况下的 HEV 工作模式切换规律

2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法首先初始化产生一群随机粒子,然后迭代寻找最优解。在每一次迭代中,粒子

通过跟踪两个极值来不断更新自己:一个是个体极值(p_{best});另一个就是全局最优解(g_{best})。粒子根据下列公式来更新速度和位置^[7]:

$$v_{ij}^{(t+1)} = \omega v_{ij}^{(t)} + c_1 r_1 (p_{best} - x_{ij}^{(t)}) + c_2 r_2 (g_{best} - x_{ij}^{(t)}) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{ij}^{(t+1)} &= v_{max} & v_{ij}^{(t+1)} > v_{max} \\ v_{ij}^{(t+1)} &= -v_{max} & v_{ij}^{(t+1)} < -v_{max} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$x_{ij}^{(t+1)} = x_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t+1)} \quad j=1,2,\dots,d \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{ij}^{(t+1)} &= x_{max} & x_{ij}^{(t+1)} > x_{max} \\ x_{ij}^{(t+1)} &= -x_{min} & x_{ij}^{(t+1)} < -x_{min} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $v_{ij}^{(t)}$ 、 $x_{ij}^{(t)}$ 分别为粒子*i*的第*j*维分量在第*t*代的速度和位置; c_1 、 c_2 为学习因子,通常 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 、 r_2 为 0~1 之间均匀分布的随机数; v_{max} 为离子的最大速度; x_{min} 、 x_{max} 分别为粒子的最小位置和最大位置; ω 为惯性权重。

为了更好地平衡粒子群算法的全局搜索能力和局部改良能力,本文采用非线性的动态惯性权重,即

$$\omega = \begin{cases} \omega_{min} - \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})(f - f_{min})}{(f_{avg} - f_{min})} & f \leq f_{avg} \\ \omega_{max} & f > f_{avg} \end{cases} \quad (5)$$

式中, ω_{min} 、 ω_{max} 分别为 ω 的最小值和最大值; f 为粒子当前的目标函数值; f_{avg} 、 f_{min} 分别为当前所有微粒的平均目标值和最小目标值。

2.2 微粒编码

采用粒子群算法优化混合动力汽车能量管理策略时,首先把整车优化中有关的控制变量集中起来进行编码,需要编码的变量如下:①图 1 中的 6 个模式切换点 a~f 的坐标(包含 12 个变量);②调整后的镍氢动力电池充放电系数 k_{char} 、 k_{disch} (包含 2 个变量)。

镍氢动力电池充放电系数 k_{char} 、 k_{disch} 的计算公式为

$$k_{char} = P_{real-char} / P_{opt-char} \quad (6)$$

$$k_{disch} = P_{real-disch} / P_{opt-disch} \quad (7)$$

式中, $P_{real-char}$ 、 $P_{real-disch}$ 分别为镍氢动力电池的实际充放电功率; $P_{opt-char}$ 、 $P_{opt-disch}$ 分别为在固定循环工况下优化后的镍氢动力电池充放电功率。

因此,该混合动力汽车能量管理策略的优化变量总计 14 个。

2.3 适应度函数的选择

动力电池的使用寿命是混合动力汽车经济性最重要影响因素之一。对于镍氢动力电池而言,一般认为温度和工作电流是影响其使用寿命的两大主要因素,并用容量衰减率来量化它们对其寿命的影响^[8],表示为

$$C_r = 0.017 I_b^4 \exp\left(\frac{-\Delta E}{K(T_0 + \Delta T_{bats})}\right) \quad (8)$$

$$\Delta T_{bats} = \int_0^t \frac{Q_{bats-gen} - Q_{bats-case}}{m_{bats} c_{bats-p}} dt \quad (9)$$

$$I_{b\text{-avg}} = \int_0^{t_{\text{all}}} |I_b| dt / t_{\text{all}} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{bats-char}} &= -0.547I_b + 3.6I_b^2 R_{\text{bats}} \\ Q_{\text{bats-disch}} &= -5.334I_b + 3.6I_b^2 R_{\text{bats}} \\ Q_{\text{bats-gen}} &= Q_{\text{bats-char}} + Q_{\text{bats-disch}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, λ 为与电流有关的衰减系数^[8](表 1); ΔE 为激活能; K 为玻尔兹曼常数; T_0 为动力电池初始温度; ΔT_{bats} 为动力电池温升^[9]; I_b 为动力电池的工作电流, 考虑到混合动力汽车在行驶过程中动力电池的工作电流在不断变化, 引入混合动力汽车整个行驶工况内的动力电池平均有效工作电流 $I_{b\text{-avg}}$ 来量化它对动力电池寿命的影响; $Q_{\text{bats-gen}}$ 为动力电池产生的总热量^[9]; $Q_{\text{bats-case}}$ 为动力电池箱表面传递到冷却空气中的热量; m_{bats} 为动力电池组总质量; $c_{\text{bats-p}}$ 为内部动力电池平均质量热容; t_{all} 为整个行驶时间; $Q_{\text{bats-char}}$ 、 $Q_{\text{bats-disch}}$ 分别为动力电池充放电时产生的热量; R_{bats} 为动力电池内阻。

表 1 工作电流与动力电池容量衰减影响系数 λ

电流(A)	[0,20]	(20,60]	(60,100]	(100,120]
充电时	0.06	0.1	0.2	0.4
放电时	0.04	0.08	0.17	0.35

由式(8)可以看出, 当动力电池初始温度一定时, 其温升的增加会导致其容量的衰减; 同时动力电池容量也会随充放电电流的增加而衰减, 导致其寿命下降。

由以上分析可知, 动力电池温升和平均有效工作电流是影响动力电池容量衰减率的重要因素, 动力电池温升的增加和工作电流的增加会使电池使用寿命下降, 从而影响混合动力汽车的经济性。因此将整车综合燃油消耗 Q_{fuel} 和动力电池容量衰减率 C_r 综合构成混合动力汽车新的优化目标函数(即适应度函数):

$$f(Q_{\text{fuel}}, C_r) = \left. \begin{aligned} &\omega_1 \left(\frac{\int_{t_0}^{t_{\text{all}}} \frac{T_e \omega_c b_e + P_{\text{bat}} \eta_{\text{bat}} b_{e\text{-cvc-avg}}}{3.6 \times 10^6 \rho_{\text{gas}}} dt \right) \\ &+ \omega_2 \frac{C_r}{C_{r\text{-avg}}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1$$

式中, ω_1 、 ω_2 分别为各优化目标的权重系数; P_{bat} 为电池的工作功率; T_e 为发动机转矩; ω_c 为发动机曲轴角速度; b_e 为发动机的实时油耗率; $b_{e\text{-cvc-avg}}$ 为循环工况下的发动机平均油耗率; ρ_{gas} 为汽油密度; η_{bat} 为电池工作效率; $Q_{\text{fuel-avg}}$ 为混合动力汽车综合燃油消耗平均值; $C_{r\text{-avg}}$ 为动力电池容量衰减率平均值。

由式(12)可以看出, 权重系数 ω_1 、 ω_2 分别表示整车综合燃油消耗和动力电池容量衰减率在整个目标函数中的重要程度。本文综合考虑整车燃油经济性和动力电池寿命因素, 采用多因素经验统计方法^[10] 选取一组权重系数 ($\omega_1 = 0.7$, $\omega_2 = 0.3$), 保证各优化子目标达到预期效果。

2.4 优化步骤与优化结果

利用粒子群优化算法对典型循环行驶工况下混合动力汽车能量管理策略中 14 个变量进行优化的步骤如下:

(1) 对 14 个优化变量进行编码, 并确定粒子的搜索范围和最大速度;

(2) 将图 1 中 12 个变量的位置以及动力电池 2 个充放电变量系数(初选为 1)作为经验粒子加入到初始粒子群中以加快搜索速度;

(3) 初始化每个粒子的速度;

(4) 将当前各微粒的位置和适应值存储在各微粒的 p_{best} 中, 将所有 p_{best} 中适应值最优个体的位置和适应值存储于 g_{best} 中;

(5) 由式(1)、式(2)更新粒子各维的速度, 由式(3)、式(4)更新粒子各维的位置;

(6) 更新式(5)中的非线性动态惯性权重;

(7) 对每一个微粒进行解码, 以数值查表的形式嵌入到混合动力汽车能量管理策略中, 将整车的优化目标函数作为其适应度值, 并根据适应度值确定是否用该粒子更新 p_{best} 与 g_{best} ;

(8) 转到步骤(4)进行迭代, 直到达到最大迭代次数或 g_{best} 的改进步长小于指定阈值。将 g_{best} 解码作为单个典型循环工况下混合动力汽车能量管理策略的最优控制参数。

采用粒子群优化算法得到了 20 个典型循环工况下混合动力汽车的相关控制参数(表 2)。

3 行驶工况识别

虽然车辆的实际运行工况是随机不确定的, 但可以通过模式识别的方法找到一个与车辆当前行驶工况最为接近的理论循环工况作为混合动力汽车能量管理策略动态优化的参考。

3.1 行驶工况的模式识别方法

行驶工况的模式识别需要两个条件: 一是已知若干标准模式构成的标准模式库(本文由所选取的 20 个典型行驶工况组成); 二是有待识别的对象, 即车辆的实际运行工况。

本文选择运算方便、实用性较强的欧几里德(Euclid)贴近距离来表示待识别样本与标准样本的接近程度^[11]。设 A_n ($n=1, 2, \dots, 20$) 为标准模式库中的样本(即本文所选 20 个典型循环工况), B 为待识别的样本(即车辆实际行驶工况), 则 A_n 与 B 之间的 Euclid 贴近距离表示为(为了消除各特征参数的量纲、数量大小以及变化幅度对贴近距离比较的影响, 采用“最大幅值为 1”方法对各样本特

表 2 20 个典型循环工况下控制策略的关键控制参数优化数据

序号	a 点坐标	b 点坐标	c 点坐标	d 点坐标	e 点坐标	f 点坐标	k_{char}	k_{disch}
1	(0.47,53.9)	(0.65,28.3)	(0.48,92.6)	(1.23,34.2)	(0.43,137.8)	(1.86,36.7)	0.898	0.937
2	(0.55,57.2)	(0.63,32.5)	(0.52,93.7)	(1.27,33.6)	(0.42,136.9)	(1.73,34.3)	0.882	0.929
3	(0.37,53.6)	(0.53,24.8)	(0.61,93.2)	(1.33,32.9)	(0.37,138.5)	(1.83,37.6)	0.908	0.946
4	(0.33,52.8)	(0.41,23.4)	(0.57,86.7)	(1.31,29.2)	(0.35,137.6)	(1.72,33.9)	0.887	0.931
5	(0.44,55.6)	(0.56,28.7)	(0.49,92.9)	(1.26,37.1)	(0.44,143.3)	(1.64,38.8)	0.896	0.949
6	(0.41,58.3)	(0.67,26.5)	(0.33,97.6)	(1.22,33.7)	(0.35,146.1)	(1.83,33.2)	0.873	0.943
7	(0.37,53.9)	(0.48,27.3)	(0.64,96.5)	(1.39,38.2)	(0.33,144.6)	(1.81,35.7)	0.878	0.932
8	(0.51,56.2)	(0.68,35.6)	(0.62,97.9)	(1.34,37.8)	(0.37,137.3)	(1.83,37.1)	0.889	0.936
9	(0.56,53.9)	(0.65,33.7)	(0.63,95.1)	(1.29,38.3)	(0.38,143.6)	(1.72,35.8)	0.873	0.925
10	(0.58,55.6)	(0.62,34.8)	(0.62,88.3)	(1.38,39.2)	(0.41,143.9)	(1.75,34.6)	0.879	0.943
11	(0.55,56.2)	(0.57,38.7)	(0.66,93.5)	(1.36,37.9)	(0.43,141.8)	(1.89,33.2)	0.903	0.952
12	(0.53,53.7)	(0.59,35.3)	(0.64,85.2)	(1.29,32.8)	(0.37,144.6)	(1.77,34.3)	0.891	0.936
13	(0.52,55.1)	(0.75,34.9)	(0.61,87.8)	(1.27,35.6)	(0.46,136.7)	(1.82,33.5)	0.916	0.948
14	(0.56,53.8)	(0.63,37.2)	(0.63,95.6)	(1.35,43.9)	(0.44,146.2)	(1.87,35.1)	0.913	0.962
15	(0.48,55.6)	(0.62,29.1)	(0.58,92.7)	(1.26,33.2)	(0.43,141.6)	(1.75,37.3)	0.902	0.951
16	(0.59,53.7)	(0.67,28.8)	(0.65,86.9)	(1.28,30.3)	(0.38,139.1)	(1.76,34.8)	0.889	0.943
17	(0.57,52.9)	(0.65,27.7)	(0.58,85.1)	(1.23,27.9)	(0.37,143.5)	(1.73,33.2)	0.907	0.939
18	(0.38,53.2)	(0.48,28.6)	(0.63,98.3)	(1.27,44.8)	(0.44,145.8)	(1.85,38.9)	0.918	0.967
19	(0.46,55.1)	(0.67,34.3)	(0.57,84.9)	(1.22,39.6)	(0.36,136.2)	(1.73,36.7)	0.908	0.948
20	(0.51,54.3)	(0.68,36.4)	(0.59,86.5)	(1.29,38.2)	(0.39,139.6)	(1.72,37.8)	0.895	0.962

征参数值进行标准化)

$$\sigma(A_n, B) = 1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \left[\sum_{k=1}^m (A_n(k) - B(k))^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

式中, m 为标准循环工况特征参数数量(本文选取了 10 个特征参数)。

利用式(13)计算出 A_n 与 B 之间的贴近期度。若存在:

$$\sigma(B, A_i) = \max(\sigma(B, A_1), \sigma(B, A_2), \dots, \sigma(B, A_n)) \quad (14)$$

则认为 B 的模式识别结果属于模式 A_i 。

3.2 行驶工况的模式识别结果

本文随机地选取了包含城市、郊区和高速公路共 5 种不同循环工况(分别是 1015_6PRIUS、CSHVR、NEDC、HWFET、UNIF01), 并且这 5 种工况按照随机顺序首尾相接(即前一个循环工况的结束时刻点作为后一个循环工况的起始时刻点), 由排列组合原理可知, 共有 $C_5^1 C_4^1 C_3^1 C_2^1 C_1^1 = 120$ 种组合。本文从 120 种行驶工况组合中随机选取一种组合(UNIF01 + 1015_6PRIUS + HWFET + NEDC + CSHVR)作为车辆的实际行驶工况。

由于选出的新工况是一种包含城市、郊区和高速公路的综合工况, 若对整个工况直接进行模式识别, 其结果并不能真实地反映车辆的行驶工况, 因此本文将该工况划分成相同的“时间块”(时间长度为 300 s), 对每个“时间块”单独进行模式识别。由此可以得到每个“时间块”与 20 个标准

循环工况的贴近期度, 将贴近期度最大的标准循环工况作为当前“时间块”的识别结果, 如图 2 所示。

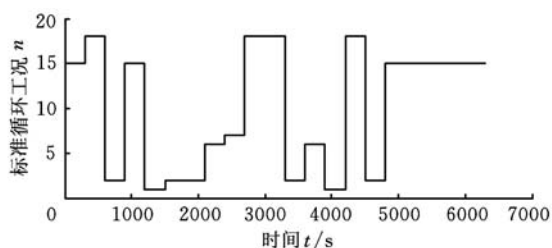


图 2 随机工况的模式识别结果

4 动态能量管理策略及仿真分析

图 3 为混合动力汽车动态能量管理策略示意图, 其核心思想是通过提取不同典型工况的相关特征参数, 然后利用工况识别方法对当前车辆的行驶工况进行辨识, 从典型工况优化数据库中选出最相似的一类工况, 将优化所得控制参数与工况驾驶需求作为整车动态能量管理策略制定的依据。

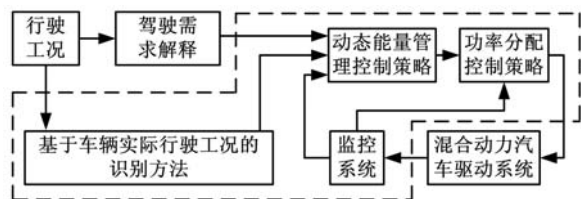
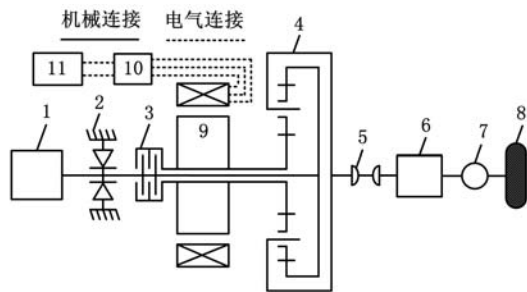


图 3 混合动力汽车动态能量管理策略示意图

在 MATLAB/Simulink 仿真环境下,利用车辆动力学理论建模与传动系统关键部件数值建模相结合的方法,建立了新型混合动力汽车^[12](其结构如图 4 所示)的性能仿真模型,该仿真模型包括三大部分:①行驶工况特征参数提取与计算模块(根据车辆实时行驶工况,提取工况识别需要的相关特征参数并对其进行计算);②车辆动力传动系统及子系统控制模块(根据车辆实时行驶状态,后向传递动力传动系统的功率流以及子系统的相关控制信号通信);③整车能量管理控制模块(主要进行车辆的工况识别及关键控制参数动态调整、模式切换、挡位切换、功率分配、与其他控制单元的通信等)。



1. 发动机 2. 单向离合器 3. 湿式多片离合器 4. 行星排
5. 十字万向节 6. AMT 变速器 7. 差速器 8. 驱动车轮
9. ISG 电动机/发电机 10. 功率转换器 11. 动力电池组

图 4 新型混合动力汽车结构

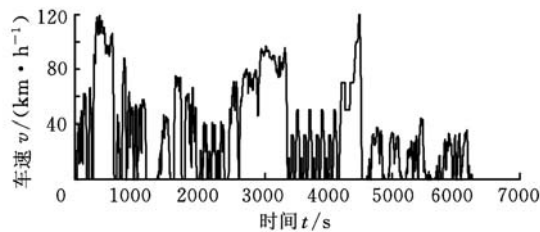
本文选取动力电池 SOC 初始值为 0.6,动力电池温度初始值为 20 °C(最高温度小于 40 °C),混合动力汽车的相关参数如表 3 所示。

表 3 混合动力汽车相关参数

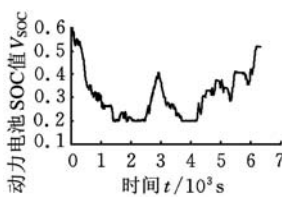
名称	数值大小
整备质量 m_0 (kg)	1350
满载质量 m_a (kg)	1875
迎风面积 A (m ²)	2.28
风阻系数 C_D	0.32
车轮滚动半径 r (m)	0.295
滚动阻力系数 f_r	0.0135
发动机峰值功率 P_{e-max} (kW)	72
ISG 电机功率 P_m (kW)	18/30(额定/峰值)
动力电池额定容量 Q_b (A·h)	6.5
标称电压 U_b (V)	288
变速器速比 i_g	(3.67, 2.05, 1.31, 0.96, 0.78)
主减速器速比 i_0	3.93
行星机构齿圈、太阳轮、行星轮齿数 (Z_r, Z_s, Z_p)	(72, 36, 18)
传动系数 k	2

图 5 给出了未采用工况识别与采用工况识别两种能量管理策略的仿真结果,未经过工况识别的能量管理策略由于对动力电池的使用没有进行动态优化管理,导致其 SOC 值下降较快(图 5b 与

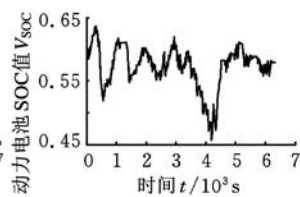
图 5c),温升较为明显(图 5f 与图 5g),并且在某些时间段内 SOC 达到了最低值 0.2,造成整车纯电动驱动模式无法实现,被迫采用工作效率不高的发动机单独驱动模式,从而增加了整车的油耗(图 5d 与图 5e)。



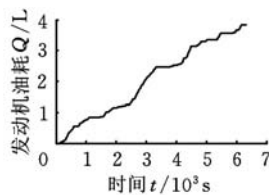
(a) 车速



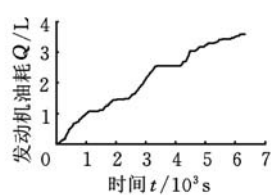
(b) 工况未识别
动力电池 SOC



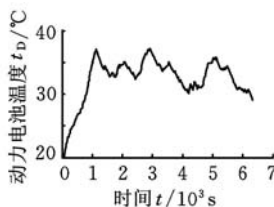
(c) 工况识别
动力电池 SOC



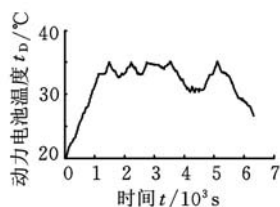
(d) 工况未识别发动机油耗



(e) 工况识别发动机油耗



(f) 工况未识别
动力电池温度



(g) 工况识别
动力电池温度

图 5 随机工况下两种能量管理策略仿真结果图

表 4 给出了两种能量管理策略的仿真对比结果。从表 4 中可以看出,采用本文提出的基于工况识别的动态能量管理策略比未采用工况识别的能量管理策略在车辆整个行驶过程中燃油消耗量下降约 10.70%,电池的温升减少约 2.46 °C,平均有效工作电流减少约 1.63 A,并且电池 SOC 的始末变化在 -0.02~0.02 内。说明采用本文提出的动态能量管理策略可根据行驶工况的变化,合理地调整混合动力汽车工作模式切换区域和动力电池的充放电功率,降低车辆综合燃油消耗、减小动力电池的温升和减小平均有效工作电流。

表 4 随机工况下两种能量管理策略仿真结果比较

	综合百公里 油耗(L)	燃油节省 率(%)	ΔV_{SOC}	ΔT_{bats} (K)	I_{bravg} (A)
未采用工况 识别的能量 管理策略	6.17		0.083	9.09	13.16
采用工况 识别的能量 管理策略	5.51	10.70	0.018	6.63	11.53

5 结论

(1)针对混合动力汽车行驶工况的随机性对能量管理策略的影响,提出了混合动力汽车行驶工况的模式识别方法,识别结果为实现混合动力汽车动态能量管理策略奠定了基础。

(2)在混合动力汽车行驶工况识别的基础上,综合考虑整车综合燃油消耗和动力电池寿命的影响,对整车能量管理控制策略中涉及的关键参数进行了优化,提出了基于工况识别的混合动力汽车动态能量管理策略。

(3)在 MATLAB/Simulink 环境下,建立了混合动力汽车性能仿真模型,通过仿真结果对比分析,证明本文提出的基于工况识别的动态能量管理策略较未采用工况识别的能量管理策略,能够有效减小动力电池的温升和平均有效工作电流,从而提高动力电池的寿命,同时能够有效降低整车综合燃油消耗。

参考文献:

[1] Beck R, Saenger S, Richert F, et al. Model Predictive Control of a Parallel Hybrid Vehicle Drivetrain [C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville,2005:2670-2675.

[2] Pisu P,Rizzoni G. A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007,15(3):506-518.

[3] Li Weimin, Xu Guoqing, Wang Zhancheng, et al. Dynamic Energy Management for Hybrid Electric Vehicle Based on Adaptive Dynamic Programming [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Chengdu,2008:1-6.

[4] Liu Xudong, Wu Yanping, Duan Jianmin. Optimal Sizing of a Series Hybrid Electric Vehicle Using a Hybrid Genetic Algorithm[C]//2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Ji-

nan,2007:1125-1129.

[5] Montazeri-Gh M, Ahmadi A, Asadi M. Driving Condition Recognition for Genetic-fuzzy HEV Control [C]//3rd International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems. Witten-Bommerholz, 2008:65-70.

[6] 朱元, 田光宇, 陈全世, 等. 行星齿轮结构的混合动力汽车的系统效率[J]. 汽车工程, 2004, 26(3): 260-265.

Zhu Yuan, Tian Guangyu, Chen Quanshi, et al. A Research on the System Efficiency of a Hybrid Electric Vehicle with Power-split Powertrain[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(3):260-265.

[7] 吴剑, 张承慧, 崔纳新. 基于粒子群优化的并联式混合动力汽车模糊能量管理策略研究[J]. 控制与决策, 2008, 23(1):46-50.

Wu Jian, Zhang Chenghui, Cui Naxin. Fuzzy Energy Management Strategy of Parallel Hybrid Electric Vehicle Based on Particle Swarm Optimization[J]. Control and Decision, 2008, 23(1):46-50.

[8] 姚雷. 混合动力汽车用 Ni-MH 电池的寿命预测 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

[9] Renhart W, Magele C, Schweighofer B. EM-based Thermal Analysis of NiMH Batteries for Hybrid Vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6):802-805.

[10] 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.

Zhang Xin, Song Jianfeng, Tian Yi, et al. Multi-objective Optimization of Hybrid Electric Vehicle Control Strategy with Genetic Algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 36-40.

[11] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.

[12] 段志辉. 汽车油电混合动力系统的机电动力耦合机构:中国,200810184141. 8[P]. 2009-05-06.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:秦大同,男,1956年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师,教育部长江学者特聘教授。主要研究方向为动力传动系统及其综合控制。发表论文 200 余篇。

彭志远,男,1981年生。长安福特汽车有限公司工程师。

刘永刚,男,1982年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士、副教授。

段志辉,男,1960年生。重庆长安新能源汽车公司高级工程师。

杨阳,男,1956年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士、副教授。