

基于 PMP 的 HEV 全局最优能量管理策略研究

许世景^{1,2} 吴志新^{1,3}

1. 天津大学, 天津, 300072 2. 河南理工大学, 焦作, 454000
3. 中国汽车技术研究中心, 天津, 300162

摘要: 动态规划常用于求取已知工况的全局最优解, 但该方法计算量大、求解时间长。为了解决这个问题, 把发电机组和电池组模型适当简化, 在保持电池组电量平衡的条件下, 以电池组荷电状态为状态变量, 以电池组输出功率为控制量, 采用庞特里亚金极小值原理算法求解了混合动力汽车的能量管理问题, 得到了全局最优解, 并给出了详细的求解过程。与动态规划相比, 该方法求解需要的时间很短。

关键词: 最优控制; 混合动力汽车; 庞特里亚金极小值原理; 能量管理策略

中图分类号: U469.7; TP273

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.01.026

Investigation of Global Optimization Energy Management Strategy of HEV Based on PMP

Xu Shijing^{1,2} Wu Zhixin^{1,3}

1. Tianjin University, Tianjin, 300072
2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454000
3. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin, 300162

Abstract: Dynamic programming usually is used to obtain the global optimal solution of the known driving cycle, but this method needs a large amount of calculation and a long computation time. To solve this problem, the models of the genset and the battery bank were simplified appropriately. Keeping the battery pack energy balanced, the battery state of charge (SOC) was used as the state variable, and the output power of the battery was used as the control variable, PMP was used to obtain the global optimal solution. And the detailed solution process was given. Compared with dynamic programming, the time required to solve by means of the method is very short.

Key words: optimal control; HEV (hybrid electric vehicle); PMP (Pontryagin's minimum principle); energy management strategy

0 引言

HEV 的能量管理策略对燃油经济性有决定性的影响。因此, 为了提高 HEV 的燃油经济性, 各国的研究人员提出了多种优化方法, 如基于规则的控制策略、模糊控制策略^[1-2]、动态规划^[3-5]、等效燃油消耗最小^[6]、极小值原理^[7-9]等。基于规则的控制策略、模糊控制策略和等效燃油消耗最小策略计算速度快, 能够实时运行。动态规划是全局优化算法, 计算量很大, 不具有实时性, 但可以从所得的结果中总结出一些用于实时控制的规则, 还可以作为其他控制策略的参考。

为了得到串联 HEV 能量管理策略的全局最优解, 本文采用分段函数拟合了发电机组的最优工作曲线。把电池组的工作区间限制在一个较小的范围, 并假定开路电压和内阻为常数。在给定工况下, 采用庞特里亚金极小值原理算法求解, 在很短的时间内就得到了全局最优解。因而, 该方法具有实时化的潜力^[7,10]。

1 混合动力汽车建模

为了研究串联 HEV 的能量管理策略, 需要建立动力总成和各个能量源的数学模型。为简化计算, 忽略了动力传动部件的效率损失。

1.1 动力总成模型

串联 HEV 动力总成的模型如图 1 所示, 发动机和发电机直接相连组成发电机组。动力总成工作模式如下: ①发动机带动发电机发电, 直接给电动机供电; ②发电机给电动机供电, 同时给电池充电; ③发电机给电池充电; ④再生制动时, 电动机工作在发电状态, 把车辆的动能转化为电能给电池充电; ⑤再生制动的能量和发电机的输出能量同时充入电池。图 1 中, 箭头表示能量的流向, 带双箭头的线段表示能量可双向流动。 $P_{\text{gen}}(t)$ 为发电机组的输出功率, $P_{\text{req}}(t)$ 为车辆的需求功率 (驱动时为正, 制动时为负), $P_{\text{batt}}(t)$ 为电池的输出功率 (放电时为正, 充电时为负)。动力总成的功率平衡关系为

$$P_{\text{gen}}(t) + P_{\text{batt}}(t) + P_{\text{req}}(t) = 0 \quad (1)$$

在给定工况下, $P_{\text{req}}(t)$ 由仿真软件计算得到, 即

收稿日期: 2012-09-07

基金项目: 国家高新技术研究发展计划 (863 计划) 资助重大项目 (2006AA11A112)

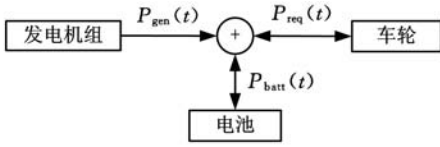


图 1 动力总成模型

$P_{req}(t)$ 是已知的。

1.2 发电机组模型

对于串联 HEV, 发动机和车轮之间没有直接的机械连接, 发动机转速可以不依赖车速独立控制。因此, 发动机可以工作在给定功率输出的最高效率处, 即发动机可以沿最优工作线运行^[11]。然后, 用分段函数对最优工作曲线进行拟合, 发电机组最优工作曲线和拟合线如图 2 所示。

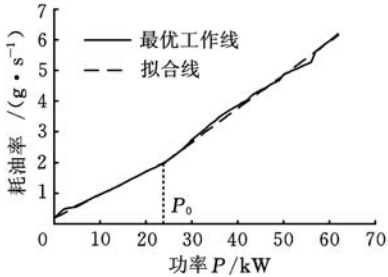


图 2 发电机组最优工作曲线及拟合曲线

图 2 中发电机组的拟合曲线可表示为

$$\dot{m}(P_{gen}) = \begin{cases} a_1 + b_1 P_{gen} & P_{gen, min} \leq P_{gen} \leq P_0 \\ a_2 + b_2 (P_{gen} - P_0) & P_0 < P_{gen} \leq P_{gen, max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\dot{m}(P_{gen})$ 为发电机组输出功率为 P_{gen} 时的耗油率, g/s ; P_0 为两条拟合线段连接处的功率, $P_0 = 24kW$; $P_{gen, min}$ 、 $P_{gen, max}$ 分别为发电机组的最小、最大输出功率; a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 为拟合系数, $a_1 = 0.1935$, $b_1 = 0.0752$, $a_2 = 1.9988$, $b_2 = 0.1091$ 。

1.3 电池模型

电量保持型混合动力汽车的电池 SOC 在一个很窄的范围内。这时, 可近似认为电池的端电压和内阻为常值^[9]。仿真中设电池 SOC 工作区间为 0.5 ~ 0.7, 在该区间内电池工作效率较高, 且近似认为电池的端电压和内阻为常值。

根据电池的电路模型可得电池的输出功率:

$$P_{batt}(t) = U_{oc} I_{batt}(t) - I_{batt}^2(t) R_0 \quad (3)$$

式中, U_{oc} 为开路电压; R_0 为等效电阻。

由式(3)得电池输出功率为 $P_{batt}(t)$ 时的电流:

$$I_{batt}(t) = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_0 P_{batt}(t)}}{2R_0} \quad (4)$$

2 能量管理问题模型

2.1 性能指标函数

能量管理策略优化的目的是使整个工况的燃

油消耗最小。因此, 性能指标用每一时刻的燃油消耗的总和来表示, 并使其达到最小:

$$\min_{T_e, \omega_e \in D} J = \int_0^{t_f} \dot{m}[t, P_{gen}(t)] dt \quad (5)$$

式中, T_e 、 ω_e 分别为发动机的转速和转矩; D 为可行域; $\dot{m}[t, P_{gen}(t)]$ 表示沿最优工作曲线输出功率为 $P_{gen}(t)$ 时的耗油率; t_f 为仿真工况的结束时间。

2.2 状态方程

电池的 SOC 为系统的状态变量, 其变化过程可表示为

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \int_{t_0}^t U_{oc} I_{batt}(\tau) d\tau \quad (6)$$

对式(6)求导即得系统的状态方程:

$$d(SOC(t))/dt = -U_{oc} I_{batt}(t) \quad (7)$$

电池是辅助能量源, 对发电机组输出功率起“削峰填谷”的作用, 从一个较长的时期来看, 驱动车辆的所有能量最终都来自发动机。因此, 为了评估能量管理策略的燃油经济性, 要求电池 SOC 的末态值等于初始值, 即

$$SOC(t_f) - SOC(t_0) = 0 \quad (8)$$

实际计算时, 取

$$|SOC(t_f) - SOC(t_0)| = |\Delta SOC| \leq \epsilon \quad (9)$$

式中, ϵ 为一个非常小的正数。

2.3 约束条件

仿真计算时, 在考虑了发动机与发电机的转速与转矩约束后, 最终得到发电机组的功率约束:

$$P_{gen, min} \leq P_{gen} \leq P_{gen, max} \quad (10)$$

电池组的输出功率 $P_{batt}(t)$ 应满足下面两个公式^[11]:

$$P_{batt, min} \leq P_{batt}(t) \leq P_{batt, max} \quad (11)$$

$$P_{req}(t) - P_{gen, max} \leq P_{batt}(t) \leq P_{req}(t) - P_{gen, min} \quad (12)$$

式中, $P_{batt, min}$ 、 $P_{batt, max}$ 分别为电池组的最小和最大功率。

3 庞特里亚金极小值原理

满足庞特里亚金极小值原理的条件是必要条件, 而非充分条件。在实际应用中, 可根据系统的物理意义进行判断。如果求解的系统具有唯一的最优解, 且根据极小值原理只能求出一个极值解, 则该解就是最优解^[11]。混合动力汽车的能量管理显然具有这样的特点, 因此, 可以采用极小值原理求出最优解。

3.1 哈密顿函数

根据式(5)、式(6), 取哈密顿函数:

$$H[SOC(t), P_{batt}(t), \lambda(t)] = \dot{m}(t, P_{gen}(t)) - \lambda(t) U_{oc} I_{batt}(t) \quad (13)$$

式中, $\lambda(t)$ 为协态变量。

综合式(2)、式(4)、式(13), 哈密顿函数可

化为
 $H =$

$$\begin{cases} a_1 + b_1 P_{gen} - \lambda(t) U_{oc} \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_0 P_{batt}}}{2R_0} \\ 0 \leq P_{gen} \leq P_0 \\ a_2 + b_2 (P_{gen} - P_0) - \lambda(t) U_{oc} \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_0 P_{batt}}}{2R_0} \\ P_0 < P_{gen} \leq P_{gen,max} \end{cases} \quad (14)$$

3.2 协态方程

由哈密顿函数可得到协态方程:

$$\dot{\lambda}(t) = - \frac{\partial H(SOC(t), P_{batt}(t), \lambda(t))}{\partial SOC} \quad (15)$$

由于取电池组开路电压与内阻为常值(均与 SOC 无关),故有 $\dot{\lambda}(t) = 0$, 即有

$$\lambda(0) = \lambda(t) \quad (16)$$

式中, $\lambda(t)$ 为常数。

3.3 最优解计算

在每一时刻, 求解使哈密顿函数取极小值的控制量 $P_{batt}(t)$, 即

$$P_{batt}^*(t) = \arg \min_{P_{batt}} H(SOC(t), P_{batt}(t), \lambda(t)) \quad (17)$$

在每一时刻, 通过式(17) 求取的 $P_{batt}^*(t)$ 就是该时刻的最优控制量。选择 $\lambda(0)$, 从给定的 $SOC(t_0)$ 开始, 电池组状态 $SOC(t)$ 通过对状态方程(式(7)) 积分得到。对工况的仿真结束时, 如果满足式(9), 则本次循环采用的 $\lambda(0)$ 就是所要求的协态变量值, 且该次循环中计算出的各个时刻的发电机组和电池组需要承担的功率即为给定工况的最优解。反之, 则调整 $\lambda(0)$ 重新计算。 $\lambda(0)$ 的调整采用最优化算法中的二分法, 仿真计算的流程如图 3 所示。

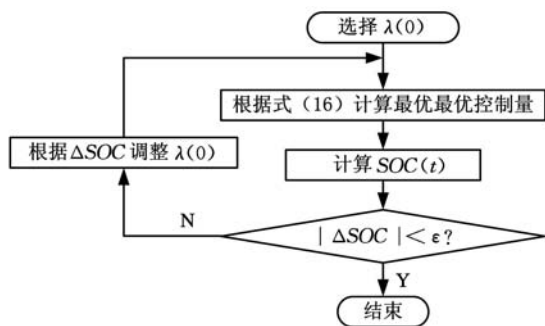


图 3 仿真计算流程图

4 仿真结果

以 ADVISOR 中的串联 HEV 为基础, 采用镍氢电池组, 车辆参数如表 1 所示。采用 UDDS 工况进行仿真, UDDS 工况曲线如图 4 所示。利用仿真软件提取整个工况的需求功率, 在 MAT-

LAB 中编写程序进行仿真, 采用 MATLAB 优化工具箱中的 fminbnd() 函数来计算使哈密顿函数取极小值的控制量, 即电池组输出功率。

表 1 车辆参数

参数	数值
发电机组最大功率(kW)	60
电池组最大功率(kW)	±35
电动机最大功率(kW)	80
空气阻力系数	0.335
迎风面积(m ²)	2.0
车辆总质量(kg)	1287
滚动阻力系数	0.009
电池 SOC 的初始值	0.5
电池组开路电压(V)	335
电池组内阻(Ω)	0.3
电池组容量(Ah)	28

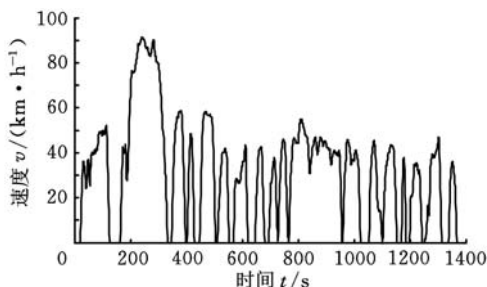


图 4 UDDS 工况

仿真得到的百公里油耗为 5.576L, 协态初始值 $\lambda(0)$ 的选取对电池组末端荷电状态的影响如图 5 所示, 当取电池组始末端的荷电状态变化小于 0.1% 时, 计算得 $\lambda(0) = -0.0746$ 。发电机组和电池组的输出功率如图 6 所示。电池组荷电状态的变化如图 7 所示。在普通的个人计算机上, 仿真计算花费的时间为 52.9s。

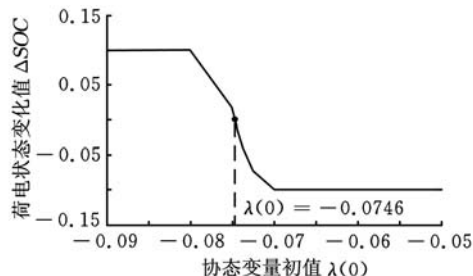


图 5 协态初值 $\lambda(0)$ 对 ΔSOC 的影响

5 结语

建立了串联 HEV 的发电机组和电池组的简化数学模型。在给定工况下, 以最小油耗为性能指标, 采用庞特里亚金极小值原理算法计算了发电机组和电池组分别需要承担的输出功率。该方

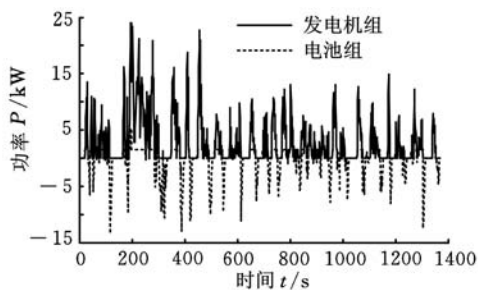


图 6 发电机组和电池组输出功率

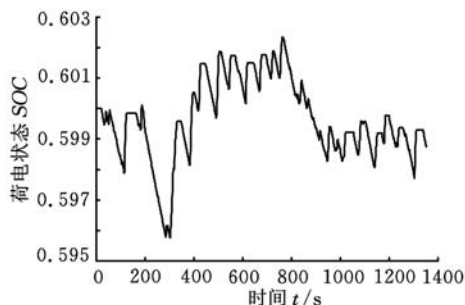


图 7 电池组荷电状态曲线

法把全局优化问题转化为一个瞬时优化问题,通过迭代运算,找到能够使电池组保持电量平衡的协态变量 $\lambda(0)$ 。同时,还可得到需求功率在发电机组和电池组之间的分配,且计算量小、计算速度快。结合工况识别技术^[12],有望得到可实时运行的能量管理策略。

参考文献:

[1] 彭涛,陈全世. 并联混合动力电动汽车的模糊能量管理策略[J]. 中国机械工程,2003,14(9):797-800.
Peng Tao, Chen Quanshi. A Fuzzy Energy Management Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(9): 797-800.

[2] 殷承良,浦金欢,张建武. 并联混合动力汽车的模糊转矩控制策略[J]. 上海交通大学学报,2006,40(1):157-162.
Yin Chengliang, Pu Jinhuan, Zhang Jianwu. The Fuzzy Torque Control Strategy for Parallel Hybrid Electric Vehicles[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(1): 157-162.

[3] Brahma A, Guezennec Y, Rizzoni G. Optimal Energy Management in Series Hybrid Electric Vehicles [C]//Proceedings of 2000 American Control Conference. Chicago, 2000: 60-64.

[4] 申彩英,夏超英. 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 427-432.
Shen Caiying, Xia Chaoying. Control Strategy of Series Hybrid Electric Vehicle Based on Improved Dy-

amic Programming[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(3): 427-432.

[5] 林歆悠,孙冬野,秦大同,等. 混联式混合动力客车全局优化控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(18): 2259-2263.
Lin Xinyou, Sun Dongye, Qin Datong, et al. Development of Power - balancing Global Optimization Control Strategy for a Series - parallel Hybrid Electric City Bus [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(18): 2259-2263.

[6] Paganelli G. Equivalent Consumption Minimization Strategy for Parallel Hybrid Powertrains[C]//IEEE 55th Vehicular Technology Conference. Birmingham, 2002: 2076-2081.

[7] Lorenzo S, Giorgio R. Optimal Control of Power Split for a Hybrid Electric Refuse Vehicle [C]// 2008 American Control Conference, ACC. Seattle, WA, USA, 2008: 4498-4503.

[8] Delprat S, Lauber J, Guerra T M, et al. Control of a Parallel Hybrid Powertrain: Optimal Control [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(3): 872-881.

[9] Namwook K, Sukwon C, Huei P. Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(5): 1279-1287.

[10] Delprat S, Guerra T M. Optimal Control of a Parallel Powertrain: From Global Optimization to Real Time Control Strategy [C]//IEEE 55th Vehicular Technology Conference. Birmingham, 2002: 2082-2088.

[11] Lorenzo S, Simona O, Giorgio R. A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2011, 133(3): 1-9.

[12] 林歆悠,孙冬野. 基于工况识别的混联式混合动力客车控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(7): 869-974.
Lin Xinyou, Sun Dongye. Development of Control Strategy for a Series - parallel Hybrid Electric City Bus Based on Roadway Type Recognition [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(7): 869-874.

(编辑 张 洋)

作者简介:许世景,男,1977年生。天津大学电气与自动化工程学院博士研究生,河南理工大学电气学院讲师。主要研究方向为混合动力汽车的能量管理策略优化。发表论文3篇。吴志新,男,1964年生。天津大学电气与自动化工程学院博士研究生导师,中国汽车技术研究中心教授级高级工程师。