

基于 PMP 算法的 HEV 能量优化控制策略

吴铁洲^{1,2} 王越洋^{1,2} 许玉珊³ 郭林鑫² 石肖² 何淑婷²

摘要 针对常用混合动力汽车 (Hybrid electric vehicle, HEV) 中锂离子电池在功率波动较大时难以满足需求, 以及单个驱动周期内 HEV 燃油能耗大且能量不能很好回收等问题, 研究采用锂离子电池和超级电容器混合储能系统 (Lithium-ion battery and super-capacitor hybrid energy storage system, Li-SC HESS) 与内燃机共同驱动 HEV 运行. 结合比例积分粒子群优化算法 (Particle swarm optimization-proportion integration, PSO-PI) 控制器和 Li-SC HESS 内部功率限制管理办法, 提出一种改进的基于庞特里亚金极小值原理 (Pontryagin's minimum principle, PMP) 算法的 HEV 能量优化控制策略, 通过 ADVISOR 软件建立 HEV 整车仿真模型, 验证该方法的有效性与可行性. 仿真结果表明, 该能量优化控制策略提高了 HEV 跟踪整车燃油能耗最小轨迹的实时性, 节能减排比改进前提高了 1.6%~2%, 功率波动时减少了锂离子电池的出力, 进而改善了混合储能系统性能, 对电动汽车关键技术后续研究意义重大.

关键词 混合动力汽车, 混合储能系统, PSO-PI 控制, 庞特里亚金极小值原理

引用格式 吴铁洲, 王越洋, 许玉珊, 郭林鑫, 石肖, 何淑婷. 基于 PMP 算法的 HEV 能量优化控制策略. 自动化学报, 2018, 44(11): 2092-2102

DOI 10.16383/j.aas.2017.c170176

Energy Optimal Control Strategy of HEV With PMP Algorithm

WU Tie-Zhou^{1,2} WANG Yue-Yang^{1,2} XU Yu-Shan³ GUO Lin-Xin² SHI Xiao² HE Shu-Ting²

Abstract Common hybrid electric vehicles (HEVs) usually suffer lithium-ion battery power fluctuations and it is difficult for them to meet the demand. This also constraints the performance of the energy storage system in which there is a the large amount of fuel consumption with less energy recovery of HEV in a single drive cycle. This paper selects a lithium-ion battery and super-capacitor hybrid energy storage system (Li-SC HESS) to drive the hybrid electric vehicle running together with an internal combustion engine. Besides, combined with particle swarm optimization-proportion integration (PSO-PI) controller and Li-SC HESS internal power limit management approach, this paper presents an improved HEV energy optimization control strategy based on the Pontryagin's minimum principle (PMP) algorithm. A simulation model of HEV is established by ADVISOR software to verify the effectiveness and feasibility of the strategy. Results show that the energy optimization control strategy can improve the real-time ability of tracking the smallest track of HEV fuel consumption function for the purpose of energy conservation. The energy-saving emission reduction ratio is improved by 1.6% to 2.0%. Moreover, when power fluctuates the output of lithium-ion battery is reduced, thus improving the performance of the Li-SC HESS. The research is significant to the follow-up study on the key technologies in electric vehicles.

Key words Hybrid electric vehicle (HEV), lithium-ion battery and super-capacitor hybrid energy storage system (Li-SC HESS), PSO-PI control, Pontryagin's minimum principle (PMP)

Citation Wu Tie-Zhou, Wang Yue-Yang, Xu Yu-Shan, Guo Lin-Xin, Shi Xiao, He Shu-Ting. Energy optimal control strategy of HEV with PMP algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 2092-2102

能源危机现在已经成为全球性的问题, 为了解

决日益贫乏的自然能源和越来越恶劣的地球环境问题, 实现汽车工业的可持续发展, 建立清洁可再生的新能源体系成为人类社会发展的必然选择. 混合动力汽车低排放、噪声低、热效率高、环保效果显著、可改善能源结构以及可回收利用的能量多等优点成为汽车工业的必然发展趋势^[1]. 考虑锂离子电池本身制约其性能和使用寿命的关键因素, 采用锂离子电池和超级电容器混合储能系统 (Lithium-ion battery and super-capacitor hybrid energy storage system, Li-SC HESS) 运用于混合动力汽车 (Hybrid electric vehicle, HEV). 如何协

收稿日期 2017-04-06 录用日期 2017-07-18
Manuscript received April 6, 2017; accepted July 18, 2017
国家自然科学基金 (51677058) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (51677058)
本文责任编辑 张卫东
Recommended by Associate Editor ZHANG Wei-Dong
1. 湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心 武汉 430068
2. 湖北工业大学电气与电子工程学院 武汉 430068 3. 东风电动车辆股份有限公司 武汉 430068
1. Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068 3. Dongfeng Electric Vehicle Limited Company, Wuhan 430068

调各储能单元出力、实时对整车动力系统能量优化管理^[2-4], 实现 Li-SC HESS 性能的优化运用并尽可能减少整车燃油能耗, 是推动 HEV 快速发展的关键技术之一^[5-6]. 能量管理控制系统由于非线性、多变量、时变等因素是混合动力汽车研究的难点^[7-8]. 各国研究者都投入了大量研究, Santucci 等^[9] 提出了一种新的模型预测控制与 DP (Dynamic programming) 算法结合的动态优化方法, 综合考虑了超级电容器 (Super-Capacitor, SC)、锂离子电池的荷电状态 (State of charge, SOC), 以及简化的电池老化模型等因素; Masih-Tehrani 等^[10] 考虑燃料消耗和周期性的电池替换等因素, 提出了基于 HEV 管理成本的 DP 算法, 较大程度地提高了能耗经济性. 但运用 DP 算法求解的计算量比较大, 耗费时间比较长, 实际应用上难度比较大. 基于规则和 PI 控制方法实现起来比较简单, 但不具有良好的工况适应性^[11]. 在线辨识可以及时获取最新的被控对象, 但是必须基于最新的模型设计^[12]. 而基于庞特里亚金极小值原理 (Pontryagin's minimum principle, PMP) 算法的能量优化控制策略, 凭借其计算速度快, 计算量较 DP 算法小的优点成为近年动态全局优化理论的研究热点^[13].

本文针对 Li-SC HESS 的 HEV, 采用 PMP 全局优化控制算法, 结合 Li-SC HESS 内部功率限值管理策略对 HEV 进行能量优化控制, 以期优化管理锂离子电池的充放电状态, 改善 Li-SC HESS 性能, 同时保证整车行驶过程中车辆的燃油能耗可以实时跟踪燃油能耗最小轨迹.

1 HEV 整车驱动模型

1.1 HEV 整车组成架构

HEV 按照动力总成结构可划分为串联式 HEV、并联式 HEV 和混联式 HEV. 其中, 串联式 HEV 整车控制系统比较简单, 但能量转换次数较多, 容易对锂离子电池使用寿命造成威胁; 并联式 HEV 两套驱动系统既可单独驱动也可共同驱动车辆, 能源利用率和燃油经济性比较高, 但是整车结构比较复杂, 控制难度大; 混联式 HEV 在结构上综合了串联式和并联式的特点, 可是控制难度更大. 综合考虑, 为尽可能减少燃油能耗, 本文主要采用并联式 HEV, 以混合动力汽车丰田普锐斯 (Prius) 为研究对象, 其动力型组成架构如图 1 所示^[14-16]. 其中, T_w , T_{ice} , T_{alt} 分别为车轮、ICE、电机的转矩; ω_w , ω_{ice} , ω_{alt} 分别为车轮、ICE、电机的转速; ρ 为减速器效率; 设变速箱共有 k 个齿轮, 对应第 k 个齿轮的变速比为 $R(k)$.

HEV 动力系统的整车功率流如图 2 所示, 箭头

表示其流动方向, 双向代表能量可双向流动^[17]. 动力总成工作模式下, HEV 驱动周期内的能量一部分来源于内燃机的能量转化, 另一部分则来源于 Li-SC HESS 的电驱动. 考虑交通环境和道路因素限制, 电动汽车尤其是城市公交客车经常处于停车、起步、加速或滑坡、平稳行驶、减速等异常频繁的运行特点下, 合理优化分配 Li-SC HESS 中锂离子电池和 SC 的输出功率, 可在 HEV 上发挥很好的优势, 能有效地减小燃油能耗, 提高 HEV 的经济性能^[18]. 当车辆起步时, 为减少内燃机能耗, 优先使用 SC 通过电动增压装置提供瞬时高功率, 减少锂离子大电流放电对其自身寿命的冲击; 在 HEV 平稳行驶过程中, 锂离子电池做 Li-SC HESS 主电源来补充电机的部分功率需求; 当车辆加速或爬坡行驶时, 为满足较高的功率需求, 平滑锂离子电池的充放电过程, SC 优先补充电机峰值变化功率缺额; 车辆制动或下坡时, SC 和锂离子电池同时回收制动能量, 不过开始时 SC 优先回收大电流比功率的能量.

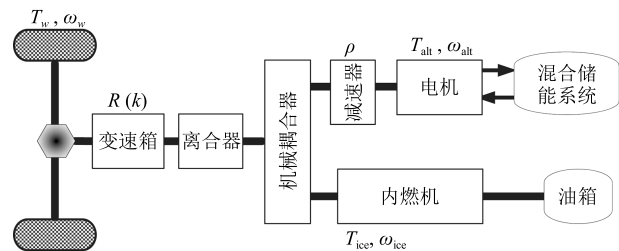


图 1 HEV 整车组成架构

Fig. 1 HEV component architecture

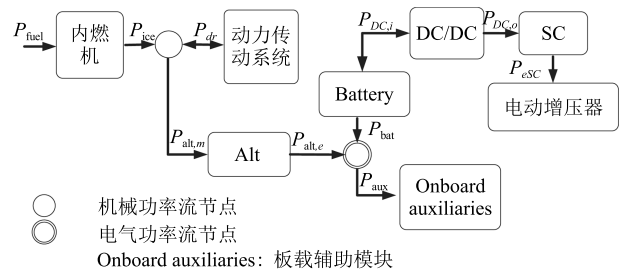


图 2 HEV 动力系统的整车功率流向示意图

Fig. 2 Power flow schematic of HEV power system

1.2 Li-SC HESS 模型

Li-SC HESS 作为 HEV 的储能装置, 其控制模块也相应地属于整车控制的一部分, 选取合适的混合储能系统等效电路模型 (包括其拓扑结构和各储能元件的等效电路模型) 及控制变量, 是开展 HEV 动力系统能量优化控制策略研究的前提条件. Li-SC HESS 拓扑结构因其组成部件、实际应用情况和连接方式的不同产生差异, 主要有 4 种: SC 和锂电池直接并联; SC 和锂离子电池通过独立配置各自 DC/DC 变流器并联; 锂离子电池 (SC) 接 DC/DC

与 SC (锂离子电池) 并联. 综合考虑 HESS 的组合类型优势、能量转换效率、系统结构的复杂程度等因素, SC 连接 DC/DC 变换器再与锂离子电池并联结构 (图 3), 比较适合目前 HEV 整车的动力性和成本的需求, 在车辆处于加速或爬坡行驶时, 能快速补充电机较高的瞬时功率需求, 还可在车辆减速、下坡和制动时很好地回收能量. 相对于锂离子电池, SC 通过各自独立配置的 DC/DC 变换器并联的拓扑结构, 控制方法较简单, 控制效率也比较高, 能较好地满足本文减少整车燃油能耗的需要.

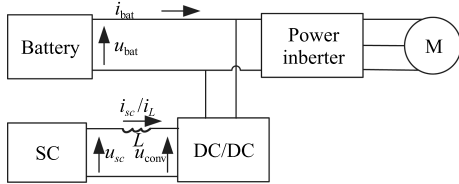


图 3 Li-SC HESS 拓扑结构

Fig.3 The topology of Li-SC HESS

1) 锂离子电池模型

采用锂离子电池等效的一阶 RC 并联电路模型即 Thevenin 模型 (图 4), 它计算量少成本低, 目前已被几个锂离子电池商家通过实验验证并选择, 例如索尼 US18650、松下 CGR18650 等.

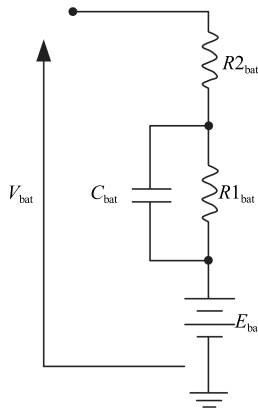


图 4 锂离子电池等效的一阶 RC 并联电路模型

Fig.4 Lithium-ion battery equivalent model based on first-order RC parallel

车载行驶条件下, 不同路况时电流会随着电机不同的功率需求而发生剧烈变化, 锂离子电池的温度等环境因素也会随之受到影响, 进而对锂离子电池的使用寿命及安全性产生威胁, 由图 4, 锂离子电池的 $SOC_{bat}(t)$ 表示为

$$SOC_{bat}(t) = \frac{1}{SOC_{bat,0}} \int_0^T \alpha(I_{bat}(t)) \beta(T_{bat}(t)) I_{bat}(t) dt +$$

$$SOC_{bat,0} \times m \times c_p \times \frac{dT_{bat}(t)}{dt} = I_{bat}^2(t) \times R2_{bat} + \frac{1}{R1_{bat}} [V_{bat}(t) - E_{bat}(t) - R2_{bat} I_{bat}(t)]^2 - h_c A [T_{bat}(t) - T_a] \quad (1)$$

其中, $Q_{bat,0}$ 是锂离子电池的容量, $\alpha(I_{bat}(t))$, $\beta(T_{bat}(t))$ 分别是电池充电/放电速率影响因子、热效应影响因子, 分别对应电池的电流 $I_{bat}(t)$ 和温度 $T_{bat}(t)$; $SOC_{bat,0}$ 为电池荷电状态初始值; m 为电池的质量; c_p 为电池的比热容; V_{bat} 为电池等效模型的端电压; h_c 为对流热传递系数; A 为等效的表面面积; T_a 为电池的环境温度.

由式 (1) 可知, $SOC_{bat}(t)$ 与当前时刻电池 $T_{bat}(t)$, $I_{bat}(t)$ 有关, 而 $T_{bat}(t)$ 也是当前时刻 $I_{bat}(t)$ 的函数. 综合得知, $SOC_{bat}(t)$ 最终可由它与当前时刻 $I_{bat}(t)$ 函数关系表征.

$$SOC_{bat}(t) = \frac{1}{Q_{bat}} \int_0^{t_{sim}} \sigma(I_{bat}(t)) I_{bat}(t) dt + SOC_{bat,0} \Rightarrow SOC_{bat}(t) = -\frac{I_{bat}(SOC_{bat}(t))}{Q_{bat}} SOC_{bat}(0) = SOC_{bat,0} \quad (2)$$

同理, 电池瞬时功率 $p_{bat}(t)$ 及相应的电流 $I_{bat}(SOC_{bat}(t))$ 表示为

$$\begin{cases} P_{bat}(t) = R_{bat} I_{bat}^2(t) + E_{bat} I_{bat}(t) \\ I_{bat}(t) = \frac{E_{bat} - \sqrt{E_{bat}^2 - 4R_{bat} P_{bat}(t)}}{2R_{bat}} \\ R_{bat} = R1_{bat} // C_{bat} + R2_{bat} \end{cases} \quad (3)$$

其中, R_{bat} 为锂离子电池的等效内阻, “//” 表示并联运算.

2) SC 模型

类似地, 考虑结构灵活性和较低的计算成本等, SC 模型采用等效一阶 RC 并联电路结构 (图 5), 其各参数物理意义明确, 在 HEV 动力系统驱动的复杂工况下, 能很好地描述大电流、电压波动的需要, 工程实用度比较高.

C_{sc} 上的电压 $V_{sc}(t)$ 类似于锂离子电池两端电压 $V_{bat}(t)$, 则 SC 的 $SOC_{sc}(t)$ 、瞬时功率 $P_{sc}(t)$ 及相应电流 $I_{sc}(SOC_{sc}(t))$ 表达式见式 (4).

式 (4) 中, R_{sc} 为 SC 等效内阻, 由 R_{ep-sc} 与 C_{sc} 并联再与 R_{es-sc} 串联等效而成; $V_{sc,max}$ 为电压 V_{sc} 最大值. $P_{sc}(t)$ 为 SC 瞬时功率; $SOC_{sc,0}$ 则为 SC 荷电状态初始值.

$$\begin{cases} \dot{SOC}_{sc}(t) = \frac{dSOC_{sc}(t)}{dt} = \frac{d(\frac{V_{sc}(t)C_{sc}}{V_{sc,max}C_{sc}})}{dt} = \frac{SOC_{sc}(t)V_{sc,max} - \sqrt{(SOC_{sc}(t)V_{sc,max})^2 - 4R_{sc}P_{sc}(t)}}{2R_{sc}V_{sc,max}C_{sc}} \\ SOC_{sc}(0) = SOC_{sc,0} \\ P_{sc}(t) = R_{sc}I_{sc}^2((SOC_{sc}(t)) + V_{sc}I_{sc}(SOC_{sc}(t))) \\ I_{sc}(SOC_{sc}(t)) = \frac{SOC_{sc}(t)V_{sc,max} - \sqrt{(SOC_{sc}(t)V_{sc,max})^2 - 4R_{sc}P_{sc}(t)}}{2R_{sc}} \end{cases} \quad (4)$$

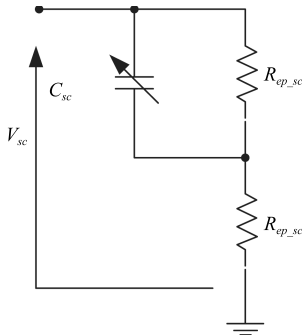


图 5 等效一阶 RC 并联电路结构的 SC 模型

Fig. 5 SC equivalent model based on first-order RC parallel circuit

2 HEV 能量优化管理问题描述

2.1 控制目标函数选取

为响应绿色能源经济的发展目标, 需较好地发挥 Li-SC HESS 的工作性能, 最大限度地减少内燃机能耗, 降低经济成本, 减少石油等化石能源消耗和环境污染程度, 将内燃机能耗最小为本文的控制目标变量. 在 HEV 动力系统的整个驱动周期 $[0, T]$ 内, 设内燃机能耗函数 Q_c 为

$$Q_c = \int_0^T P_{fuel}(T_{ice}(t), \omega_{ice}(t))dt \quad (5)$$

其中, T 为计算的结束时刻; $P_{fuel}(T_{ice}(t), \omega_{ice}(t))$ 为 t 时刻的瞬时燃油功率; 相应 ICE 转速为 $\omega_{ice}(t)$, 转矩为 $T_{ice}(t)$.

2.2 目标函数控制量的约束条件

HEV 车的能量优化管理需要从全局角度综合考虑目标函数的限制约束性, 主要从车辆结构约束、ICE 和电机物理模型约束及 Li-SC HESS 状态约束三个方面考虑.

1) 车辆结构约束

设计合理的能量优化控制策略时, 通常将电动汽车的驱动力和车速视为给定的系统状态条件, 分

别记为 $F_v(t)$ 和 v , 为方便描述, 通常将其转化为驱动周期内后向系统车轮转矩 $T_w(t)$ 和车轮转速 $\omega_w(t)$, 即可分别转化成驱动周期下车辆 $T_{ice}(t)$ 与 $T_{alt}(t)$ 、 $\omega_{ice}(t)$ 与 $\omega_{alt}(t)$ 的叠加 (车辆电机输出端的转矩为 $T_{alt}(t)$ 、转速为 $\omega_{alt}(t)$). 具体关系描述为

$$\begin{cases} T_w(t) = R(k(t))\eta_{gb}(T_{ice}(t) + \rho T_{alt}(t)) = \\ R(k(t))\eta_{gb}T_{ps}(t) \\ \omega_w(t) = \frac{\omega_{ice}(t)}{R(k(t))} = \frac{\omega_{alt}(t)}{\rho R(k(t))} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $k(t)$ 为车辆齿轮数, 驱动周期通常由 $\omega_w(t)$ 和 $k(t)$ 共同定义, 且当 $\omega_w(t)$ 和 $k(t)$ 已知时, 在所要求的车轮转矩 $T_w(t)$ 下可以很容易地推导出内燃机能耗函数 Q_c 的动力学方程式 (5).

2) ICE 和电机物理模型控制约束

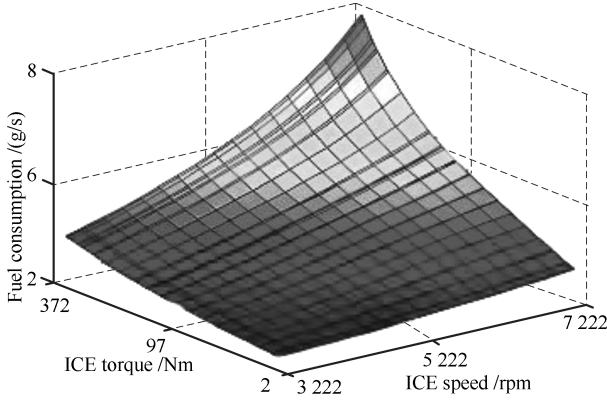
ICE 是一个复杂的系统, 其中许多物理现象不容易建模, 例如燃烧过程. 在此, 忽略 ICE 的温度依赖性及其自身的动态特性. 用静态的查表法 (Look-Up-Table, LUT) 得到关于 $T_{ice}(t)$ 和 $\omega_{ice}(t)$ 的瞬时燃油能耗函数分布曲线图 (图 6(a)), 同理, 给定 T_{alt} 和 ω_{alt} , 结合有关电机 LUT 法, 得到电机效率函数及相应的最大电流曲线图 (图 6(b) 和图 6(c)).

由图 6 静态查表法可以看出, ICE 和电机转速都给定时, 对应转矩分别受其最大可用转矩的限制, 即有

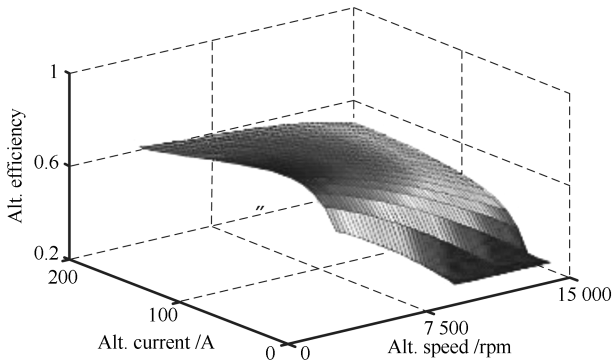
$$\begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \omega_{ice,min} \leq \omega_{ice}(t) \leq \omega_{ice,max} \\ T_{ice,min}(\omega_{ice}(t)) \leq T_{ice}(t) \leq T_{ice,max}(\omega_{ice}(t)) \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \omega_{alt,min} \leq \omega_{alt}(t) \leq \omega_{alt,max} \\ T_{alt,min}(\omega_{alt}(t)) \leq T_{alt}(t) \leq T_{alt,max}(\omega_{alt}(t)) \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

由式 (6) 可知, 主轴转矩 $T_{ps}(t) = T_{ice}(t) + \rho T_{alt}(t)$, 考虑电机转矩的限制条件, 当任意 t 时刻时, ICE 极小值 $\underline{T}_{ice,min}(\omega_{ice}(t))$ 和极大值 $\bar{T}_{ice,max}(\omega_{ice}(t))$ 满足

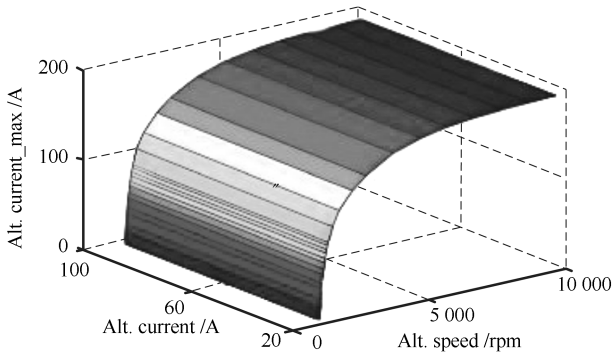
$$\begin{cases} \underline{T}_{ice,min}(\omega_{ice}(t)) = \max\{T_{ice,min}(\omega_{ice}(t)), \\ T_{ps}(t) - \rho T_{alt,max}(\omega_{alt}(t))\} \\ \bar{T}_{ice,max}(\omega_{ice}(t)) = \min\{T_{ice,max}(\omega_{ice}(t)), \\ T_{ps}(t) - \rho T_{alt,min}(\omega_{alt}(t))\} \end{cases} \quad (8)$$



(a) $T_{ice}(t)$ 和 $w_{ice}(t)$ 作用下瞬时燃油能耗函数分布曲线图
(a) Distribution graph of instantaneous fuel consumption function under the action of $T_{ice}(t)$ and $w_{ice}(t)$



(b) 电机电流 (I_{alt}) 和转速 (w_{alt}) 作用下 Alt. 效率函数曲线图
(b) Graph of Alt. efficiency function curve under the action of I_{alt} and w_{alt}



(c) Alt. 电流和旋转速度作用下 Alt. 最大电流曲线图
(c) Graph of Alt. maximum current curve under the action of I_{alt} and w_{alt}

图 6 静态查表法得到的相关曲线图
Fig.6 Static correlation table obtained by the relevant curve

3) Li-SC HESS 控制约束条件

储能元件中, 荷电状态是表征储能元件过充过放和循环使用寿命的重要参量. 根据 Li-SC HESS 等效数学模型, 一定驱动周期内, 为尽可能减少其充放电次数, 需限制其荷电状态 $SOC_{bat}(t)$ 及充放电过程中的电池电流 $I_{bat}(t)$, 及 SC 的 $SOC_{sc}(t)$ 和 $I_{sc}(t)$.

$$\begin{cases} SOC_{bat,min} \leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat,max} \\ I_{bat,min} \leq I_{bat}(t) \leq I_{bat,max} \\ SOC_{sc,min} \leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc,max} \\ I_{sc,min} \leq I_{sc}(t) \leq I_{sc,max} \end{cases} \quad (9)$$

由于锂离子电池和 SC 都属于能量缓冲装置. 在充电持续状态下, PMP 算法计算时为评估能量优化控制的燃油经济性, 需满足末端约束条件 $\Delta SOC_{bat} \approx 0$ 和 $\Delta SOC_{sc} \approx 0$, 其中

$$\begin{aligned} \Delta SOC_{bat} &= SOC_{bat}(T) - SOC_{bat}(0) \\ \Delta SOC_{sc} &= SOC_{sc}(T) - SOC_{sc}(0) \end{aligned} \quad (10)$$

3 基于 PMP 算法的能量优化管理策略

3.1 构建 Hamiltonian 函数

由式 (5) 有关 ICE 能耗函数 Q_c , 即 PMP 算法的性能泛函方程, 当终端时间 T 给定时, 能耗问题可转化为终端状态受约束的拉格朗日问题, 对应哈密尔顿 (Hamiltonian) 函数为

$$\begin{aligned} H_a(SOC_{bat}, SOC_{sc}, T_{ice}, I_{DC,o}, \lambda_1, \lambda_2) = & P_{fuel}(T_{ice}, \omega_{ice}) - \lambda_1 \frac{I_{bat}(SOC_{bat})}{Q_{bat,0}} - \\ & \lambda_2 \frac{I_{sc}(SOC_{sc}, I_{DC,o})}{Q_{bat,0}} + \lambda_d \Phi(SOC_{sc}) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 为了将 Li-SC HESS 中锂离子电池和 SC 的动态特性紧密联系起来, 且考虑 SC 优先快速响应大电流变化的特性, 并对其进行过充过放保护, 本文引入一个动态缓冲变量 $\Phi(SOC_{sc})$ 作惩罚函数来约束 Li-SC HESS 动态过程, 具体描述为

$$\begin{aligned} \dot{X}_d = \Phi(SOC_{sc}) = & [SOC_{sc} - SOC_{sc,min}]^2 sg(SOC_{sc,min} - SOC_{sc}) + \\ & [SOC_{sc,max} - SOC_{sc}]^2 sg(SOC_{sc} - SOC_{sc,max}) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $sg(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$, 当且仅当 SOC_{sc} 满足

式 (12) 时, $\dot{X}_d(t) = 0$. 则有, $X_d(t) = \int_0^t \dot{X}_d(t)dt + X_d(0)$, 其终端约束条件为 $X_d(T) = X_d(0) = 0$.

3.2 Hamiltonian 函数取极值的必要条件及求解

根据 Hamiltonian 函数方程式 (11), 寻求 Q_c 取极小值的必要条件, 即满足协态方程组 (式 (13)), 以求解出协态变量的初始值.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{SOC}_{bat}^* = \frac{\partial H_\alpha(\cdot)}{\partial \lambda_1} = -\frac{I_{bat}(SOC_{bat}^*)}{Q_{bat,0}} \\ \dot{\lambda}_1^* = -\frac{\partial H_\alpha(\cdot)}{\partial SOC_{bat}} = \frac{\lambda_1^*}{Q_{bat,0}} \frac{\partial I_{bat}(SOC_{bat}^*)}{\partial SOC_{bat}} \\ \dot{SOC}_{sc}^* = \frac{\partial H_\alpha(\cdot)}{\partial \lambda_2} = -\frac{I_{sc}(SOC_{sc}^*, I_{DC,o}^*)}{C_{sc}} \\ \dot{\lambda}_2^* = -\frac{\partial H_\alpha(\cdot)}{\partial SOC_{sc}} = \frac{\lambda_1^*}{Q_{bat,0}} \frac{\partial I_{bat}(SOC_{bat}^*)}{\partial SOC_{sc}} + \\ \frac{\lambda_2^*}{C_{sc}} \frac{\partial I_{sc}(SOC_{sc}^*, I_{DC,o}^*)}{\partial SOC_{sc}} - \\ \frac{C_{sc}}{2\lambda_d^* [SOC_{sc}^* - SOC_{sc,min}]} \times \\ sg(SOC_{sc,min} - SOC_{sc}^*) - \\ \frac{C_{sc}}{2\lambda_d^* [SOC_{sc,max} - SOC_{sc}^*]} \times \\ sg(SOC_{sc}^* - SOC_{sc,max}) \\ \dot{X}_d^* = -\frac{\partial H_\alpha(\cdot)}{\partial \lambda_d} = [SOC_{sc}^* - SOC_{sc,min}]^2 \times \\ sg(SOC_{sc,min} - SOC_{sc}^*) + \\ [SOC_{sc,max} - SOC_{sc}^*]^2 \times \\ sg(SOC_{sc}^* - SOC_{sc,max}) \end{array} \right. \quad (13)$$

且

$$\left\{ \begin{array}{l} SOC_{bat}^*(T) \approx SOC_{bat}^*(0) = SOC_{bat,0}, \\ SOC_{bat}^* \in [SOC_{bat,min}, SOC_{bat,max}] \\ SOC_{sc}^*(T) \approx SOC_{sc}^*(0) = SOC_{sc,0}, \\ SOC_{sc}^* \in [SOC_{sc,min}, SOC_{sc,max}] \\ X_d^*(0) = 0 \\ \frac{\partial I_{sc}(SOC_{sc})}{\partial SOC_{sc}} = -\frac{V_{sc,max} I_{sc}(SOC_{sc})}{\sqrt{(SOC_{sc} V_{sc,max})^2 - 4R_{sc} P_{sc}}} \\ \dot{\lambda}_1^* = 0, \dot{\lambda}_2^* = 0, \dot{\lambda}_d^* = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

得

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1^* = \lambda_{10}, \lambda_2^* = \lambda_{20}, \lambda_d^* = \lambda_{d0} \\ H_\alpha(SOC_{bat}^*, SOC_{sc}^*, T_{ice}^*, I_{DC,o}^*, \lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_d^*) \leq \\ H_\alpha(SOC_{bat}^*, SOC_{sc}^*, T_{ice}, I_{DC,o}, \lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_d^*) \\ \forall t \in [0, T], \forall (T_{ice}, I_{DC,o}) \in \Omega \end{array} \right. \quad (15)$$

其中,

$$\Omega = \begin{cases} T_{ice} \in (\underline{T}_{ice,min}(\omega_{ice}(t), \bar{T}_{ice,max}(\omega_{ice}(t))) \\ I_{DC,o} \in (\underline{I}_{DC,o}, \bar{I}_{DC,o}) \end{cases}$$

为控制变量 T_{ice} 和 $I_{DC,o}$ 的可容集.

综合上述可知, t 时刻的最优控制问题转化为求解 Li-SC HESS 荷电状态的初始条件 $SOC_{bat,0}$ 和 $SOC_{sc,0}$, 以及协态变量初值 $\lambda_0 = (\lambda_{10}, \lambda_{20}, \lambda_{d0})$. 其中, $SOC_{bat,0}$, $SOC_{sc,0}$ 可以直接给出, 则亦进一步简化为, 在车辆驱动周期内的边界条件约束下 Li-SC HESS 各储能单元的初始出力系数 λ_{10} 和 λ_{20} 以及惩罚力度因子 λ_{d0} 的求解, 使协态初值 λ_0 作用下控制变量 T_{ice} 和 $I_{DC,o}$ 在可容集 Ω 范围内取极小值.

此时, 若定义 $s_1 = -\lambda_1/E_{bat}(SOC_{bat})Q_{bat,0}$; $s_2 = -\lambda_2/SOC_{sc}C_{sc}$, 该系统的 Hamiltonian 数学模型可表示为

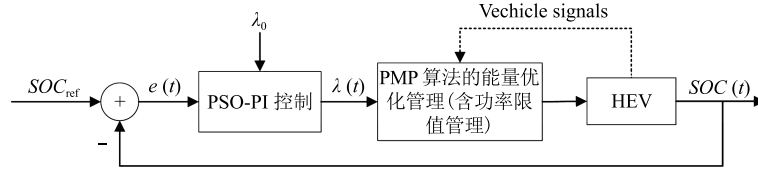
$$\begin{aligned} H_\alpha(SOC_{bat}, SOC_{sc}, T_{ice}I_{DC,o}, s_1, s_2) = \\ P_{fuel}(T_{ice}, \omega_{ice})s_1P_{bat,i}(SOC_{bat}) + \\ s_2P_{sc,i}(SOC_{sc}, I_{DC,o}) + \lambda_d\Phi(SOC_{sc}) \end{aligned} \quad (16)$$

式 (16) 中, $P_{fuel}(T_{ice}, \omega_{ice})$, $P_{bat,i}(SOC_{bat})$ 和 $P_{sc,i}(SOC_{sc}, I_{DC,o})$ 分别对应当前时刻 ICE 燃油能耗功率、内部锂离子动力电池功率和 SC 的功率, s_1 , s_2 , λ_d 分别为 Li-SC HESS 内相应的加权因子. 可明显看出, Hamiltonian 函数的实际意义描述为等效燃料动力函数, 即 HEV 一定驱动周期内车辆使用的所有能源的加权功率之和, 这与能量守恒定律相一致, 从物理学层面验证了 PMP 算法在实际对象中应用的可行性. 运用 PMP 算法求解得出在线因果系统进而对协态参数的在线控制, 称为“ λ -控制”方法.

3.3 基于 PSO-PI 实时优化的“ λ -控制”

上述求出的协态变量初始值 λ_0 是在离线状态下的常量, 但在循环驱动周期内使用 PMP 算法每次迭代最优燃油能耗时各能源的输出功率不同, 故须保证任意时刻“ λ -控制”的实时性. 本文采用粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 算法寻优 PI 闭环控制器的参数, 形成 PSO-PI 控制器来实时优化“ λ -控制”, 以提高反馈闭环控制的灵活性和自适应的特性, 并提高其鲁棒性, 且收敛速度快, 易实现, 计算效率高.

考虑 Li-SC HESS 各储能单元的荷电状态 $SOC(t)$, 假设当前时刻 Li-SC HESS 荷电状态的参考值为 SOC_{ref} , 计算机控制系统环境下, 设定采样周期 T , $t = kT$, 引入 PI 闭环反馈, 对应 PSO-PI 控制框图如图 7.

图 7 PSO-PI 实时优化的“ λ -控制”框图Fig. 7 PSO-PI real-time optimization “ λ -control” block diagram

$$\tilde{\lambda}(t) = \lambda_0 + k_p(SOC_{ref} - SOC(t)) + k_i \sum_{i=1}^k ((SOC_{ref} - SOC(i))) \quad (17)$$

则只需对 PI 控制器的 k_p 和 k_i 两个参数进行优化, 即 $D = 2$. 根据 ITAE (Integral of time multiplied by the absolute value of error) 指标, 综合考虑了稳态误差和调节时间的性能指标, 超调量小且过度平稳, 实用性较好. 故采纳 ITAE 准则来计算 PSO 算法的目标函数. 此外, PSO 算法中待优化问题的每一个潜在最优解分别代表一个可解空间中的粒子, 例如粒子 i , 对应第 i 个粒子适应度函数下的适应度值, 若引入粒子的当前位置 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, $i = 1, 2, \dots, n$, 当前速度 $\nu_i = (\nu_{i1}, \nu_{i2}, \dots, \nu_{id})$, 所有粒子飞行的最好位置轨迹为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$, 个体极值 $p_{best,i} = (p_{best,i1}, p_{best,i2}, \dots, p_{best,id})$, 群体极值 $p_{gbest,i} = (p_{gbest,i1}, p_{gbest,i2}, \dots, p_{gbest,id})$ 以及惯性权重 h , 则按照下式进行粒子的更新与迭代.

$$\left\{ \begin{array}{l} J = \int_0^{+\infty} t |e(t)| dt \\ \nu_{id,k+1} = h\nu_{id,k} + c_1 r_1 \times (p_{best,id,k} - x_{id,k}) + c_2 r_2 \times (p_{gbest,id,k} - x_{id,k}) \\ x_{id,k+1} = x_{id,k} + \nu_{id,k+1} \\ h = h_{initial} - \frac{[(h_{initial} - h_{end})] \times k}{k_{max}} \end{array} \right. \quad (18)$$

其中, $d = 1, 2, \dots, D$; h 为惯性权重; r_1 和 r_2 分别为 $(0, 1)$ 之间的随机数; c_1 和 c_2 为非负常数作进化因子; $x_{id,k}$ 和 $\nu_{id,k}$ 分别是 D 维空间内第 k 次迭代时所更新的第 i 粒子的位置和速度; $h_{initial}$ 为初始惯性权重; k_{max} 为最大迭代次数; h_{end} 为 k_{max} 时的惯性权重. 取 $h_{initial} = 0.9$ 和 $h_{end} = 0.4$, 保证初期时有较强全局搜寻能力, 同时后期时便于算法进行局部搜索.

PSO-PI 控制器参数优化主要步骤如下:

步骤 1. 假定粒子 i 有参数 k_p , k_i , 群体规模、当前迭代次数 k 及最大迭代次数 k_{max} 、惯性权重、

学习因子、个体极值 $p_{best,i}$ 和群体极值 $p_{gbest,i}$ 等, 并随机对粒子的 x_i 和 ν_i 进行初始化;

步骤 2. 按照式 (3)~(23) 更新粒子的 $x_{id,k}$ 和 $\nu_{id,k}$, 然后按照式 (3)~(28) 计算每个粒子的适应度值 J_i ;

步骤 3. 比较 J_i 与相应的个体极值 $p_{best,i}$, 若 $J_i < p_{best,i}$, 则更新 $p_{best,i}$ 所在的位置代替 P_i 当前位置;

步骤 4. 比较 J_i 与相应的群体极值 $p_{gbest,i}$, 若 $J_i < p_{gbest,i}$, 则更新 $p_{gbest,i}$ 所在的位置代替 P_i 当前位置;

步骤 5. 对算法的终止约束进行判定, 若终止则直接跳到步骤 6; 否则重复步骤 2~4;

步骤 6. 输出优化后的 k_p , k_i 参数值.

3.4 Li-SC HESS 功率限制管理

前面以整车动力性和整车燃油能耗最小为主要分析对象, 初步确立了 HEV 动力系统的能量优化管理方法, 分配的处理系数可以保证 Li-SC HESS 的各个储能单元功率之间进行协调分配, 但该控制方法的荷电状态约束条件仅仅以防止 Li-SC HESS 的过充过放为基本条件. 为进一步提高 Li-SC HESS 的性能, 需要对 Li-SC HESS 各个储能单元充放电状态下的功率进行实时在线管理, 整车能量优化控制流程图如图 8 所示.

根据锂离子电池功率密度低、能量密度强、寿命有限和 SC 快速响应高功率变化的特性, 考虑电机的需求功率变化时 SC 预先响应原则, 规定在储能元件 SOC 达到严重过充 (或过放) 的上 (或下) 限值时, Li-SC HESS 禁止该储能元件的充电 (或放电); 在 SC 的 SOC_{sc} 未达到严重限值的情况下, 则将 SOC_{sc} 分为 SC 正常工作区间 (SOC_{low}, SOC_{high})、可功率限值管理区间 (SOC_{high}, SOC_{max}) \cup (SOC_{min}, SOC_{low}). 对 Li-SC HESS 实施充放电限值管理, 具体办法如下:

ΔP_{bat} 和 ΔP_{sc} 分别为锂离子电池和 SC 的修正功率, 且 $\Delta P_{bat} = -\Delta P_{sc}$ (以下过程不再描述 ΔP_{bat} 的表达式). 正常工作时, SC 的荷电状态 $SOC_{sc} \in (SOC_{low}, SOC_{high})$, $\Delta P_{sc} = 0$, 各个储能元件的功率不改变; 放电功率越限时, 功率修正规则如下式:

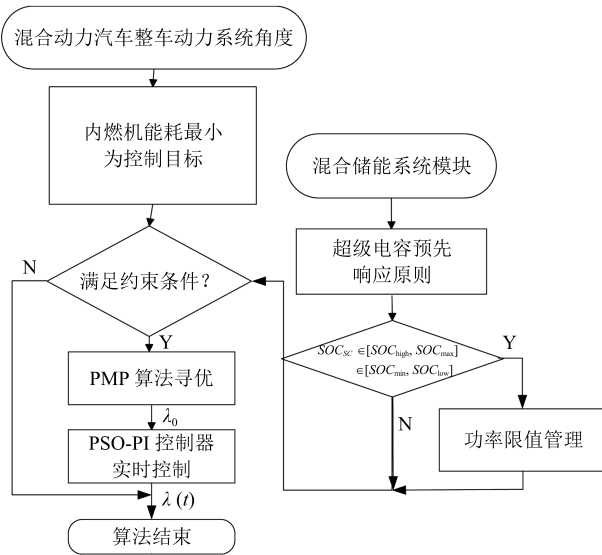


图 8 HEV 能量优化整体控制流程图

Fig. 8 The overall flow chart of HEV energy optimization control

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{sc} = 0, \quad SOC_{sc} > SOC_{sc,max} \\ \Delta P_{sc} = P_{sc,ref} \left(\frac{SOC_{sc} - SOC_{sc,high}}{SOC_{sc,max} - SOC_{sc,high}} \right) = A, \\ \quad SOC_{sc} \in (SOC_{sc,high}, SOC_{sc,max}) \\ \Delta P_{sc} = -P_{sc,ref} \left(\frac{SOC_{sc,low} - SOC_{sc}}{SOC_{sc,low} - SOC_{sc,min}} \right) = B, \\ \quad SOC_{sc} \in (SOC_{sc,min}, SOC_{sc,low}) \\ \Delta P_{sc} = -P_{sc,ref}, \quad SOC_{sc} < SOC_{sc,min} \end{array} \right. \quad (19)$$

同理, 充电功率越限时, 功率修正规则如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{sc} = -P_{sc,ref}, \quad SOC_{sc} > SOC_{sc,max} \\ \Delta P_{sc} = -A, \\ \quad SOC_{sc} \in (SOC_{sc,high}, SOC_{sc,max}) \\ \Delta P_{sc} = -B, \\ \quad SOC_{sc} \in (SOC_{sc,min}, SOC_{sc,low}) \\ \Delta P_{sc} = 0, \quad SOC_{sc} < SOC_{sc,min} \end{array} \right. \quad (20)$$

4 结果及分析

本文研究的带有 Li-SC HESS 的 HEV 是运用 ADVISOR 软件, 在传统的基于锂离子电池的 HEV 模型基础上, 二次开发后得到的 (图 9)。

考虑到国内大多小型汽车用户主要在城市日常使用的需求, 本文采用的是城市道路循环工况

(CYC-UDDS), 汽车驾驶循环速度随时间的变化曲线如图 10(a) 所示, 实际驾驶循环的齿轮位置显示如图 10(b) 所示. 从图 10(a) 和图 10(b) 可以看出, 汽车驾驶循环的速度随着齿轮位置的改变表现良好地跟踪特性, 基本符合实际一定驱动周期内车辆驾驶循环的评估要求, 从而验证了该种 PMP 算法能量优化控制电动汽车的可行性。

1) HEV 动力系统能量优化前后对比及 PSO 实时优化出力系数结果. 储能系统在汽车驾驶循环周期内正常工作时, 可以通过电机提供或吸收部分能量, 减少 ICE 燃油能耗. 图 11(a) 和图 11(b) 分别为 PMP 算法能量优化控制整车动力系统前后电机转矩曲线. 为了较好地表现该能量优化控制方法的实时跟踪性, 针对单一锂离子电池, 得出 Hamiltonian 函数出力系数 $\lambda(t)$ 曲线图 (图 12)。

对比图 11(a) 和图 11(b) 知, 使用 PMP 算法后, 电机转矩曲线波动明显比使用 PMP 算法之前变化剧烈, 电机的功率需求明显增加, 根据能量守恒, 表明储能装置通过电机吸收的部分 ICE 燃油能耗明显增长; 另外, 该种控制策略还可以通过电机实时调节 ICE 沿着燃油能耗极小值的轨迹移动. 图 12 明显表征了基于 PMP 算法的 HEV 能量优化控制方法对协态变量 $\lambda(t)$ 的良好动态跟踪特性, 即满足减少 ICE 燃油能耗的控制目标, 也进一步验证了 PMP 算法设计的合理性与可行性。

2) 单一锂离子电池储能和 Li-SC HESS 仿真情况对比. 由图 13(a) 和图 13(b) 可知, 无论锂离子电池的荷电状态还是 SC 的荷电状态都基本符合庞特里亚金极小值原理 (即 PMP 全局优化算法) 的末端约束条件, 进一步验证了该种能量优化控制的 PMP 算法的合理性及有效性. 另外, 在汽车驾驶循环周期内, 图 13(b) 和图 14(b) 中嵌入了 SC 的 Li-SC HESS, 明显减少了锂离子电池的出力, 锂离子电池充/放电电流明显比单一锂离子电池作用下充/放电电流小, 很好地平滑了锂离子电池的充/放电过程, 也明显减少了相应地锂离子电池的充/放电次数. 体现出了 Li-SC HESS 各储能元件之间良好的协调能力, 对延长电池的使用寿命有很大帮助. 同时, 也验证了本文所设计的带有 Li-SC HESS 的 HEV 整车能量优化控制方法的正确性和有效性。

5 结束语

本文设计的 HEV 较传统机动车引入了混合储能装置, 兼具 ICE 与 Li-SC HESS 各自的优点. 例如, 内部的 ICE 可以利用现有加油站资源, 减少总体投资成本, 而且可以弥补纯电动汽车难以解决除霜和空调等大能耗问题的缺陷; Li-SC HESS 有助于延长传统 HEV 动力电池使用寿命, 延长汽车的续航

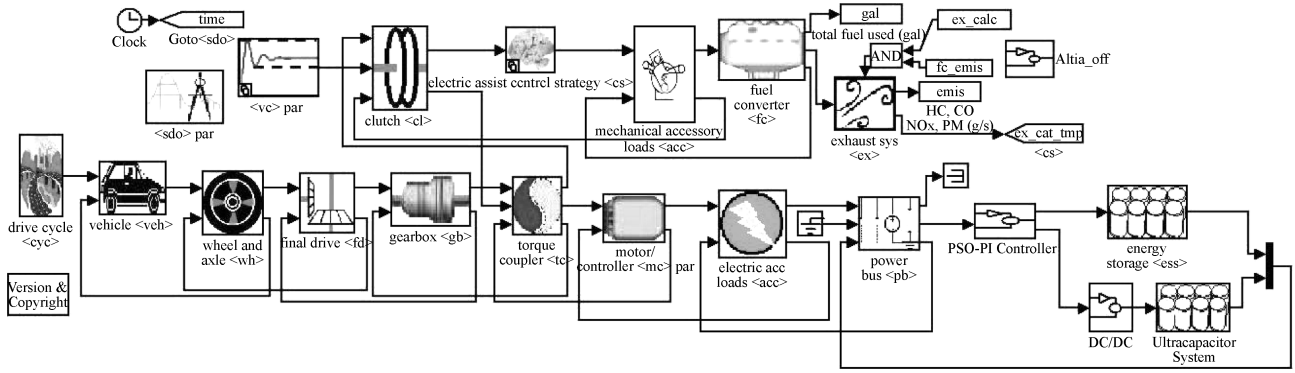
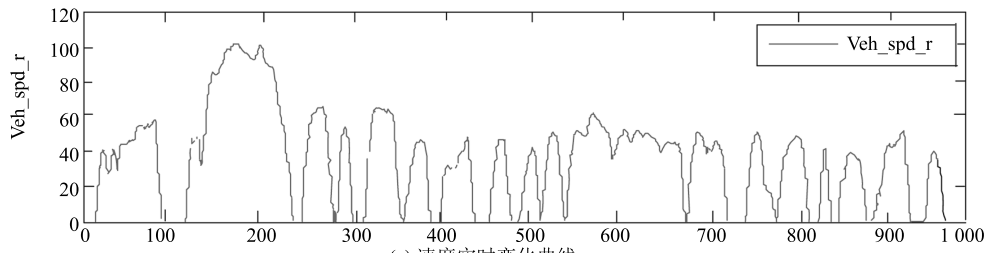
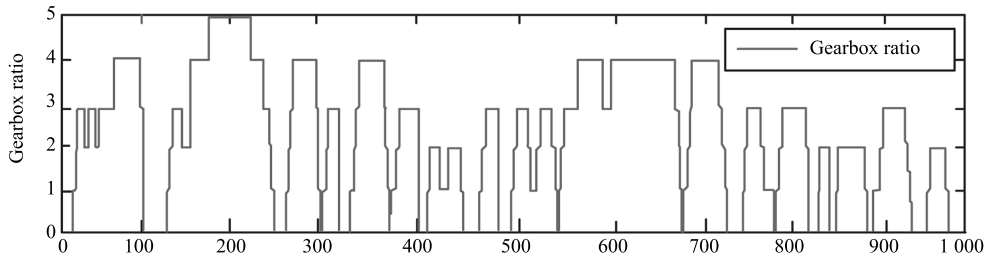


图9 HEV 整车仿真模型
Fig.9 HEV simulation model

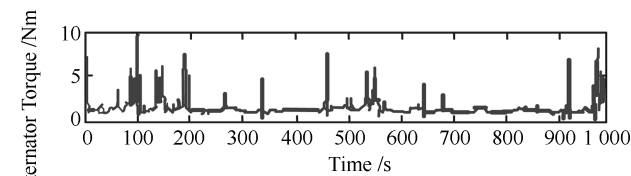


(a) 速度实时变化曲线
(a) Real-time curve of speed

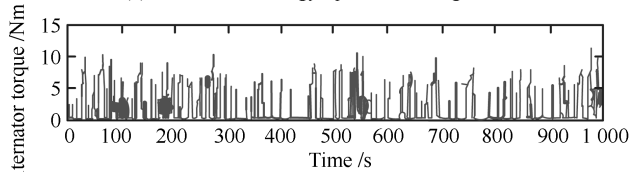


(b) 齿轮位置显示图
(b) Gear position display

图10 CYC-UDDS 工况下汽车驾驶循环速变化曲线
Fig.10 Under CYC-UDDS, real-time curve of driving cycle



(a) PMP 算法能量优化前
(a) Before PMP energy optimization algorithm



(b) PMP 算法能量优化后
(b) After PMP energy optimization algorithm

图11 PMP 算法能量优化前后对比图
Fig.11 After before the comparison chart of PMP energy optimization algorithm

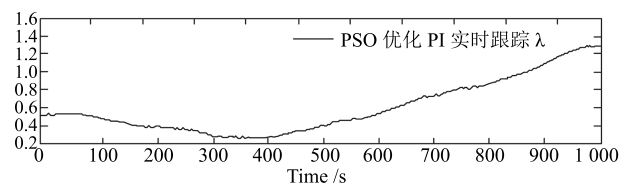


图12 PSO-PI 控制器实时优化 Hamiltonian 函数出力系数 $\lambda(t)$ 曲线图

Fig.12 Graph of output coefficient real-time optimization of Hamiltonian function by PSO-PI controller

里程. 尤其是 SC 的嵌入使 Li-SC HESS 能很好地适用于车辆起步、变速及能量回收制动过程. 同时, 对 HEV 能量优化控制还可有效减少汽车尾气排放量, 降低城市环境的污染度, 具有很高的研究价值, 也为今后进一步研究纯电动汽车 Li-SC HESS 协调分配奠定基础.

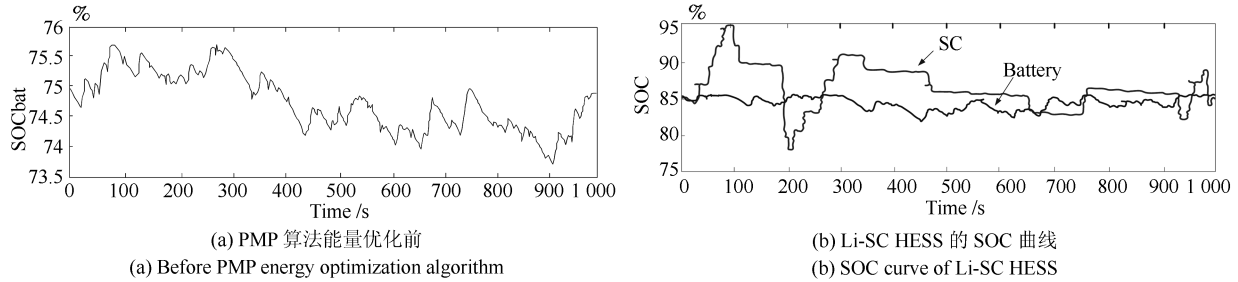


图 13 单一锂离子电池和 Li-SC HESS SOC 仿真情况对比

Fig. 13 Comparison of single lithium-ion battery and Li-SC HESS SOC simulation

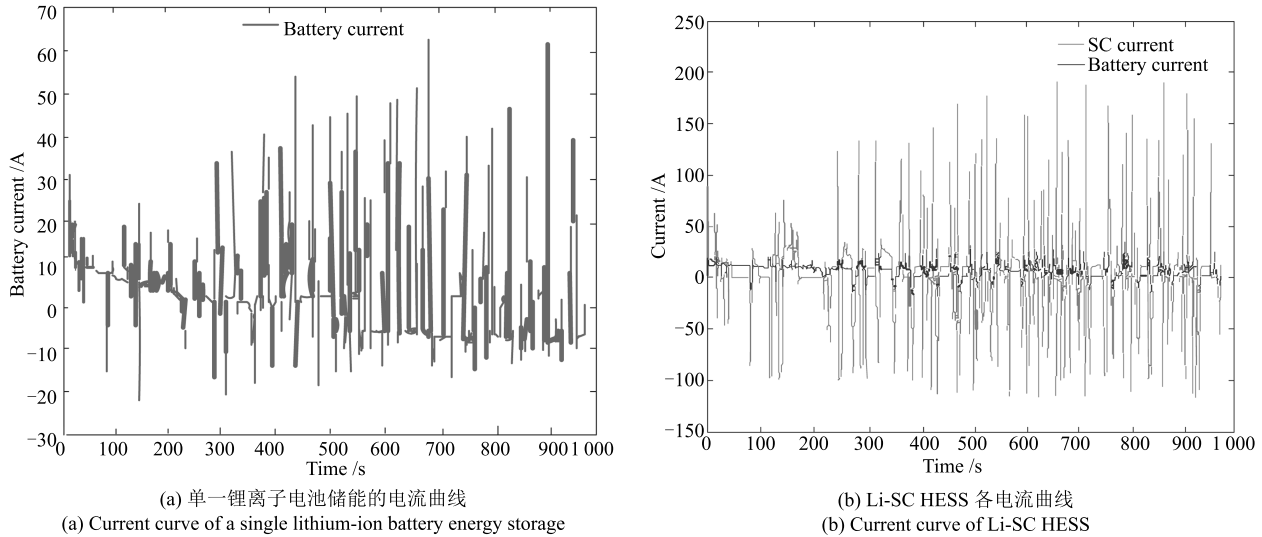


图 14 单一锂离子电池和 Li-SC HESS 电流曲线图

Fig. 14 Single lithium-ion battery and Li-SC HESS current curve

References

- Zhao Xiu-Chun, Guo Ge. Survey on energy management strategies for hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(3): 321–334
(赵秀春, 郭戈. 混合动力电动汽车能量管理策略研究综述. 自动化学报, 2016, **42**(3): 321–334)
- Kim T, Qiao W, Qu L Y. Real-time state of charge and electrical impedance estimation for lithium-ion batteries based on a hybrid battery model. In: Proceedings of the 2013 Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Long Beach, USA: IEEE, 2013. 563–568
- Yang Pei-Gang, Zhou Yu-Cai, Liu Zhi-Qiang, Jia Guang-Rui, Xiong Shao-Hua. Modeling and simulation of pure electric vehicle with composite power source based on ADVISOR. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2015, **30**(3): 66–71
(杨培刚, 周育才, 刘志强, 贾光瑞, 熊少华. 基于 ADVISOR 的纯电动汽车复合电源建模与仿真. 电力科学与技术学报, 2015, **30**(3): 66–71)
- Chang W Y. Estimation of the state of charge for a LFP battery using a hybrid method that combines a RBF neural network, an OLS algorithm and AGA. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2013, **53**: 603–611
- Gan M, Peng H, Dong X P. A hybrid algorithm to optimize RBF network architecture and parameters for nonlinear time series prediction. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, **36**(7): 2911–2919
- Sharafi M, ELMekkawy T Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renewable Energy*, 2014, **68**: 67–79
- Xu Shi-Jing, Wu Zhi-Xin. Investigation of global optimization energy management strategy of HEV based on PMP. *China Mechanical Engineering*, 2014, **25**(1): 138–141
(许世景, 吴志新. 基于 PMP 的 HEV 全局最优能量管理策略研究. 中国机械工程, 2014, **25**(1): 138–141)
- Xia Chao-Ying, Zhang Cong. Real-time optimization control algorithm of energy management strategy for hybrid electric vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(3): 508–517
(夏超英, 张聪. 混合动力系统能量管理策略的实时优化控制算法. 自动化学报, 2015, **41**(3): 508–517)
- Santucci A, Sornioti A, Lekakou C. Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications. *Journal of Power Sources*, 2014, **258**: 395–407
- Masih-Tehrani M, Ha'iri-Yazdi M R, Esfahanian V, Safaei A. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement. *Journal of Power Sources*, 2013, **244**: 2–10

- 11 Schneider M, Biel K, Pfaller S, Schaede H, Rinderknecht S, Glock C H. Optimal sizing of electrical energy storage systems using inventory models. *Energy Procedia*, 2015, **73**: 48–58
- 12 Zhang Pei-Jian, Wu Jian-Guo. Research of characteristic model predictive functional control based on on-line identification. *Computer Simulation*, 2010, **27**(11): 299–302
(张培建, 吴建国. 基于在线辨识的特征模型预测函数控制研究. 计算机仿真, 2010, **27**(11): 299–302)
- 13 Su X Y, Zhou W S, von Bally G, Vukicevic D. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating. *Optics Communications*, 1992, **94**(6): 561–573
- 14 Xia Chao-Ying, Du Zhi-Ming. Simulation analysis on energy optimization strategy for Toyota PRIUS hybrid electric vehicle. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, **47**(2): 373–383
(夏超英, 杜智明. 丰田 PRIUS 混合动力汽车能量优化管理策略仿真分析. 吉林大学学报(工学版), 2017, **47**(2): 373–383)
- 15 Qin Da-Tong, Yang Guan-Long, Liu Yong-Gang, Lin Yu-Pei. A research on energy consumption optimization control strategy for plug-in hybrid electric vehicle. *Automotive Engineering*, 2015, **37**(12): 1366–1370, 1377
(秦大同, 杨官龙, 刘永刚, 林毓培. 插电式混合动力汽车能耗优化控制策略的研究. 汽车工程, 2015, **37**(12): 1366–1370, 1377)
- 16 Lei Si-Jun, Song Xiao-Wen. Optimization of an automobile transmission system with genetic algorithm and ADVISOR. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, **29**(9): 1137–1141
(雷嗣军, 宋小文. 遗传算法与 ADVISOR 联合优化仿真汽车动力传动系统. 机械科学与技术, 2010, **29**(9): 1137–1141)
- 17 Li Bao-Lei, Shi Xin-Ling, Gou Chang-Xing, Lv Dan-Ju, An Zhen-Zhou, Zhang Yu-Feng. Multivariate optimization algorithm and its convergence analysis. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(5): 949–959
(李宝磊, 施心陵, 苟常兴, 吕丹桔, 安镇宙, 张榆锋. 多元优化算法及其收敛性分析. 自动化学报, 2015, **41**(5): 949–959)
- 18 Wang Qi, Sun Yu-Kun, Huang Yong-Hong. Research on a distribution strategy of braking force used in hybrid electric vehicles with battery-ultracapacitor hybrid energy storage system. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, **29**(S1): 155–163
(王琪, 孙玉坤, 黄永红. 一种蓄电池-超级电容器复合电源型混合动力汽车制动力分配策略研究. 电工技术学报, 2014, **29**(S1): 155–163)



吴铁洲 湖北工业大学电气与电子工程学院教授, 华中科技大学博士. 主要研究方向为储能技术, 系统分析与集成.
E-mail: wtz315@163.com

(**WU Tie-Zhou** Professor at the School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University. He received his Ph.D. degree from Huazhong

University of Science and Technology. His research interest covers energy storage technology, system analysis and integration.)



王越洋 湖北工业大学电气与电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为电动汽车快速充放电, 储能技术, 本文通信作者. E-mail: wangyueyang214@163.com
(**WANG Yue-Yang** Master student at the School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology. His research interest covers electric vehicle rapid charge discharge and energy storage technology. Corresponding author of this paper.)



许玉姗 2016 年于湖北工业大学获得硕士学位. 主要研究方向为混合储能与能量功率分配策略.
E-mail: 18271898759@163.com

(**XU Yu-Shan** Received master degree from Hubei University of Technology in 2016. Her research interest covers hybrid energy storage and energy

power allocation.)



郭林鑫 湖北工业大学电气与电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为混合储能系统容量的配置.
E-mail: guolinxin212@163.com

(**GUO Lin-Xin** Master student at the School of Electronic and Electrical Engineering, Hubei University of Technology. His research interest covers capacity distribution of hybrid energy storage system.)



石肖 湖北工业大学电气与电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为电动汽车混合储能系统控制策略.
E-mail: xiao164@163.com

(**SHI Xiao** Master student at the School of Electronic and Electric Engineering, Hubei University of Technology. His research interest covers control

strategy of hybrid energy storage system of electric vehicles.)



何淑婷 2017 年于湖北工业大学获得硕士学位. 主要研究方向为光伏发电和混合储能. E-mail: xwyaster@163.com

(**HE Shu-Ting** Received master degree from Hubei University of Technology in 2017. Her research interest covers photovoltaic power generation and hybrid energy storage.)