

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.02.016

基于系统效率的 PHEV 电量消耗模式 控制策略优化

孙 蕾¹, 林歆悠²

(1. 华侨大学 机电与自动化学院, 福建 厦门 361021; 2. 福州大学 机械设计及自动化学院, 福建 福州 350002)

摘要: 为了进一步发挥混合动力汽车的节油性能, 插电式混合动力汽车 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) 在电量消耗 (Charge-Depleting, CD) 模式下, 制订系统效率最优的能量管理策略来提高整车的电消耗行驶里程, 进而实现提升整车燃油经济性的目的。分析了系统在电量消耗模式下相关典型工作模式, 以车辆动力学方程为基础, 推导出系统效率模型。以需求转矩、动力电池荷电状态、电机转速作为动力系统的输入, 将系统效率最优作为系统的目标价值函数, 在动力性指标的约束下, 优化获得在电量消耗模式下的电机转矩和无级变速器速比的最佳控制规律, 综合数值建模和试验数据建模方法, 基于 Matlab/Simulink 软件平台构建插电式混合动力汽车的发动机、驱动电机、无级变速器 (CVT) 和动力电池等动力传动系统关键部件效率数值模型和整车动力学模型以及驾驶员模型, 在新欧洲行驶循环 (New European Driving Cycle, NEDC) 工况下进行模型在环循环仿真验证分析。仿真结果表明, 插电式混合动力汽车在电量消耗模式下, 基于系统效率最优的能量管理策略能够使动力电池运行更加高效, 转矩的分配更为合理, 无级变速器获得较佳的控制规律。与直观式逻辑控制相比, 纯电动续航里程提升了 10.9 km, 即经济性提高了 15.3%, 充分体现了所制订的控制策略的有效性。

关键词: 汽车工程; 最佳控制规律; 系统效率; 无级变速器; 插电式混合动力汽车; 电量消耗模式; 能量管理策略

中图分类号: U471.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 02-0115-07

Optimization of Control Strategy of PHEV Charge-depleting Mode Based on Optimal System Efficiency

SUN Lei¹, LIN Xin-you²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen Fujian 362021, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China)

Abstract: In order to further enhance the fuel efficiency of hybrid vehicles, the optimal system efficiency based energy management strategy for PHEV in CD mode is established to improve the electric mileage so as to achieve the purpose of improving vehicle fuel economy. The typical working model of the system in CD mode is analyzed. Based on the vehicle dynamics equation, the system efficiency model is derived. Taking the required torque, the battery state of charge (SOC), motor speed as inputs of the power system, the optimal system efficiency as goal value function, and the performance indicators as the constraint, the optimal control laws both of the motor torque and CVT ratio in CD mode could be obtained by optimizing system efficiency. Integrating numerical modeling and experimental data modeling methods, the numerical model, the vehicle dynamics model and the driver model of the efficiency of key components of engine, driving motor, CVT and power battery of the PHEV power transmission system are established based on platform of

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51505086)

作者简介: 孙蕾 (1982-), 女, 福建厦门人, 研究生. (94072408@qq.com)

Matlab/Simulink. The cyclic simulation analysis of the models in New European Driving Cycle is carried out. The simulation result shows that (1) the optimal system efficiency based energy management strategy can make the battery operates more efficiently, the torque distributes more reasonably, and the CVT obtains optimal control rule for PHEV in the CD model; (2) compared with the intuitive logic control strategy, the pure electric mileage is enhanced 10.9 km, the fuel economy is increased by 15.3%, it fully manifested the effectiveness of the established control strategy.

Key words: automobile engineering; optimal control rule; system efficiency; continuously variable transmission (CVT); plug-in hybrid electric vehicle (PHEV); charge-depleting (CD) mode; energy management strategy

0 引言

插电式混合动力汽车 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) 是传统混合动力汽车向纯电动汽车发展的一种过渡车型, 外部可以对电池充电, 具备较长纯电动里程, 且能够如同传统混合动力汽车一般高效率地运行, 达到降低整车燃油消耗和使用成本的目的^[1-3]。对于 PHEV, 由于拥有比 HEV 更大的电池容量, 其能量管理策略主要解决 PHEV 在行驶过程中, 合理分配发动机与电池能量, 实现车辆在满足动力性能前提下, 得到比 HEV 更好的燃油经济性, 同时消除对于 EV 而言的纯电动里程焦虑。

PHEV 的核心之一是能量管理策略, 目前能量管理控制策略大致可分为基于 CD-CS 的能量管理策略、基于优化算法的能量管理策略以及基于工况识别的能量管理策略^[4-5]。当前 PHEV 投入商用的能量管理策略的工作模式分为两种: 电量消耗模式 (Charge-Depleting, CD) 和电量保持模式^[6] (Charge-Sustaining, CS)。当电池荷电状态 SOC 值高于 SOC 阈值时, PHEV 工作于电量消耗模式。在电量消耗模式, PHEV 像 EV 一样纯电动行驶, 由电池通过电动机提供所需的能量; 当 SOC 值小于 SOC 阈值时, PHEV 工作于 CS 模式, 一直行驶到目的地, 从而 PHEV 动力电池能够再次从电网获得电能。

Banvait H, Anwar S^[7] 等提出一种基于 CD-CS 能量管理策略, 在电池电量较高时, 采用 CD 模式策略, 电机提供主要动力, 当需求转矩超过电动机的外特性曲线时, 发动机参与工作; 在电池 SOC 值降到 SOC 阈值时, 采用 CS 模式, 由发动机提供整车行驶功率, 同时, 发动机在电机辅助下, 使电池 SOC 值维持在设定目标值附近, 该策略比常规的 HEV 电力辅助策略燃油经济性有明显提高。CHEN Zheng, FU Yuhong^[8] 等依据发动机经济运行曲线的上下限, 设定整车 CD 与 CS 模式切换的条件, 针对一款并联

结构的 PHEV 在 ECE 工况进行仿真, 该策略较大程度提高了整车的燃油经济性。Lee H, Kim H^[9] 等人提出了在电量消耗模式下以最小等效油耗为前提, 基于电机高效运行的 CVT 速比控制策略。Li S. G^[10] 等利用模糊控制规划一款串联 PHEV 的电池 SOC 轨迹, 利用 CD-CS 策略制订模糊控制规则, 在保证燃油经济性下, 阻止电池过度放电。目前的相关研究, 在制订控制策略时, 忽略了在车辆运行过程中, 动力电池充放电、电机和 CVT 的效率对动力系统能量利用率的影响^[11-13]。MALAIZE J^[14] 等针对装备 CVT 的并联汽车, 建立传动系统的状态方程和约束条件, 在指定工况下将油耗最小为系统目标函数, 求得发动机、电机及 CVT 的最优控制。任勇^[15] 等提出了基于系统效率最优的转矩分配方案, 以车速、加速度和电池 SOC 值为输入, 优化分配驱动工况下的动力源的输出转矩。孙四军^[16] 结合各动力部件效率对发动机工作点调整前后的能耗参数进行了仿真分析, 提出一种能根据混合动力系统整体效率来调整发动机工作点的控制方法。连静^[17] 等分析动力系统各部件的结构与效率特性, 构建出各模式下的效率评估方程, 依据需求扭矩和蓄电池荷电状态得出系统最高效率下对应的发动机转矩和电机转矩分配情况, 以控制发动机和电机相应转矩输出。

本文针对 PHEV 的电量消耗模式, 综合考虑发动机、电机、电池及 CVT 等动力部件的效率, 以整车系统效率最优作为控制目标, 以动力性指标和电池 SOC 作为约束条件, 获得 CVT 的最优速比以及发动机、ISG 电机和电动机的转矩分配的优化。

1 PHEV 关键动力部件模型

1.1 PHEV 动力系统简介

本文的 PHEV 动力系统结构是一种采用 CVT 变速器的混联结构, 如图 1 所示。其主要部件包括发动机、电池、ISG (Integrated Starter/Generator) 电

机、离合器、电动机、CVT 变速器、差速器等。整车控制器通过控制离合器的分离和接合, 实现 PHEV 不同工作模式的切换和 ISG 电机对发动机的启动。通过 CAN 数据总线实现各控制器和控制单元之间的通信、汽车运行状态的监控、相关参数的传递等, 完成对汽车的控制。控制策略根据从整车控制器获得的汽车当前功率需求、电池 SOC 和行驶状况信号, 由控制策略决定发动机和电机的各种组合方式。当处于纯电动驱动或发动机电机混合驱动模式时, 电机将电池中的电能转化为动能为 PHEV 提供驱动力; 当再生制动或发动机对电池在线充电时, 电机作为发电机给电池充电。

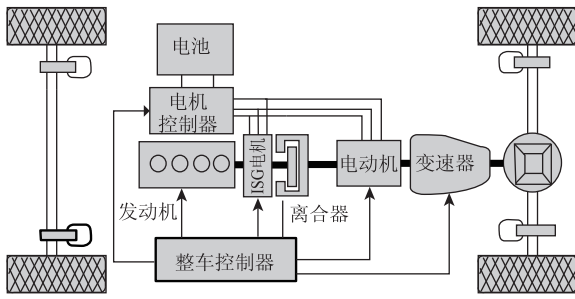


图1 整车动力系统结构

Fig. 1 Structure of vehicle power system

1.2 PHEV 关键动力系统建模

1.2.1 电动机数值建模

在建立模型的过程中, 将电机及其控制器综合为一个整体, 考虑其输入输出特性。驱动电机既可以在纯电动和混合驱动模式作为动力源, 为整车驱动提供动力, 又可以在再生制动模式给电池充电, 因此建模时要考虑这两种情况。

电机模型中非常重要的部分就是电机效率的计算, 它可以通过插值得到, 电机效率、转矩和转速的关系可如式(1)表示:

$$\eta_{em} = \eta_{em}(n_{em}(t), T_{em}(t)). \quad (1)$$

ISG 电机的数值模型与驱动电机的数值模型建立类似, 图2为驱动电机的效率模型。

1.2.2 动力电池组数值模型

动力电池数学模型是 PHEV 建模中重要组成部分。因为它不仅是 PHEV 行驶的动力源之一, 而且其容量对纯电动续航里程有较大影响。这里采用相对简单的内阻模型。

当电流 $I > 0$, 表示电池放电; 当电流 $I < 0$, 则代表电池充电。假设温度不变的情况下, 电动势 E 与电池 SOC 值的关系为:

$$E = f(SOC). \quad (2)$$

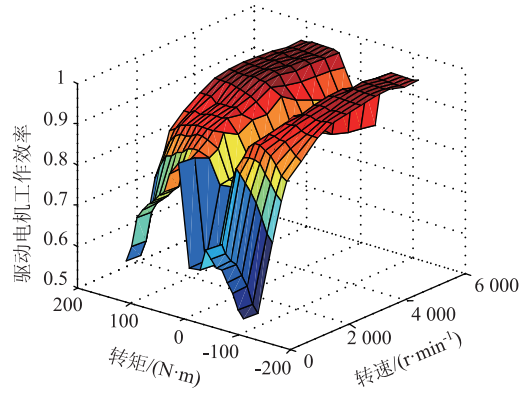


图2 驱动电机效率数值模型

Fig. 2 Numerical model of motor efficiency

由试验测试获得的动力电池充放电内阻的关系曲线, 如图3所示。

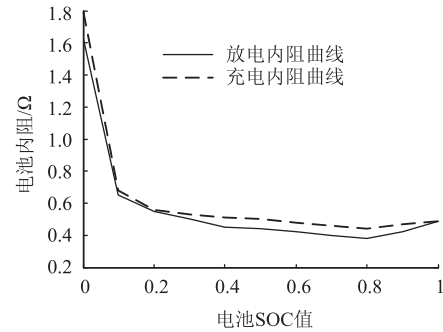


图3 电池充放电内阻与SOC值关系曲线

Fig. 3 Curves of relationship between charge/discharge battery resistance and SOC

通过试验测试获得的电动势和 SOC 值、充放电内阻的关系曲线, 得到电池组的充放电效率为:

$$\eta_{bchg} = \frac{P_b}{P_m} = \frac{(E - \sqrt{E^2 - 4RP_m})E}{2RP_m}, \quad (3)$$

$$\eta_{bdis} = \frac{P_m}{P_b} = \frac{2RP_m}{(E - \sqrt{E^2 - 4RP_m})E}, \quad (4)$$

式中, η_{bchg} , η_{bdis} 为电池的充放电效率。 P_b 为电池功率, 当 $P_b > 0$, 电池放电; 当 $P_b < 0$ 时, 电池充电。图4所示为电池充电效率数值模型, 其具体表示为充电效率是电池 SOC 值和电池功率的函数关系。

1.2.4 CVT 数值模型

CVT 数值模型, 对于仿真而言, CVT 传动效率是重要的数值模型, 其传动效率与转矩、速比的关系, 主要通过试验获得 CVT 效率特性数据, 然后通过插值拟合的方法获得 CVT 效率模型, 如图5所示。

$$\eta_{cvt} = f(n_{cvt}, T_{cvt}), \quad (5)$$

式中, η_{cvt} 为 CVT 传动效率; n_{cvt} 为 CVT 输入转速; T_{cvt} 为 CVT 输入转矩。

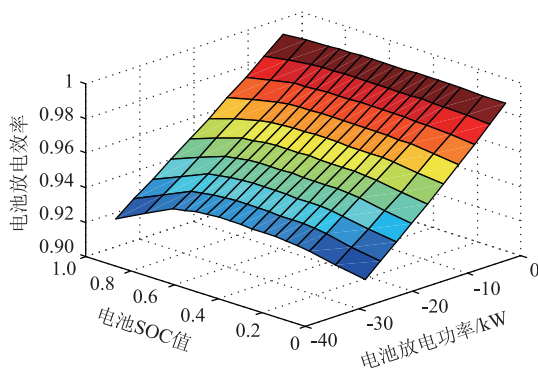


图4 电池充电效率模型

Fig. 4 Battery charge efficiency model

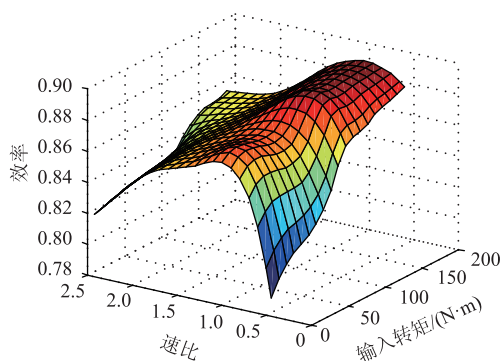


图5 CVT效率模型

Fig. 5 CVT efficiency model

2 基于系统效率的CD模式控制策略

2.1 电消耗模式下的工作模式分析

本文PHEV突出特点在于通过控制离合器的状态,实现多种驱动模式的切换。PHEV工作模式可分为电量消耗、电量保持和常规充电3种工作模式。在起步与高工况时采用电量消耗模式外,PHEV主要工作在电量保持模式下^[18]。基于本文动力系统的结构特点,针对在PHEV的电量消耗模式阶段,其实际运行过程分为2种工作模式:纯电动与混合驱动模式。在电量消耗模式下PHEV控制策略制订见表1。

表1 电量消耗模式PHEV实际工作模式及工作条件

Tab. 1 Real working modes and working conditions under charge-depleting mode

工作模式	条件	转矩分配
CD纯电动	$0 \leq T_{\text{req}} \leq T_{\text{mmax}}$	$T_{\text{m}} = T_{\text{req}}$
	$SOC > SOC_L$	$T_e = 0$
CD混合驱动	$T_{\text{req}} > T_{\text{mmax}}$	$T_{\text{m}} = \max(T_{\text{mmax}}, T_{\text{req}} - T_{\text{emin}})$
	$SOC > SOC_L$	$T_e = T_{\text{req}} - T_{\text{m}}$

2.2 电消耗模式下的系统效率优化

由于具体篇幅限制,这里仅以纯电动模式下的系统效率优化为例进行说明。纯电动模式下,离合器分离,发动机、ISG电机不参与工作,由电池放电,并由驱动电机驱动整车行驶。将电池的放电功率作为系统的输入功率,即:

$$P_{\text{in}} = \frac{T_{\text{m}} n_{\text{m}}}{9550 \eta_{\text{m}} \eta_{\text{b-dis}}}, \quad (6)$$

式中, T_{m} 为电动机转矩; n_{m} 为电动机转速, η_{m} 为电动机效率; $\eta_{\text{b-dis}}$ 为电池放电效率。

系统输出功率是车辆克服地面的滚动阻力、空气阻力、坡度阻力和加速阻力所需功率即:

$$P_{\text{out}} = F_{\text{t}} u, \quad (7)$$

式中,

$$F_{\text{t}} = mgf \cos \alpha + mg \sin \alpha + \frac{C_{\text{d}} A u^2}{21.15} + \frac{I_{\text{t}} i_{\text{cvt}}^2 \eta_{\text{t}} u}{r^2} \frac{di_{\text{cvt}}}{dt}.$$

由此纯电动驱动模式的系统效率为:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = F_{\text{t}} u / T_{\text{m}} n_{\text{m}} \cdot (9550 \eta_{\text{m}} \eta_{\text{b-dis}})^{-1}, \quad (8)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} n_{\text{m}} = \frac{u i_{\text{cvt}} i_0}{0.377 r} = \frac{30 n_{\text{m}}}{\pi} \\ T_{\text{cvtin}} = T_{\text{m}} i_{\text{cvt}} i_0 \eta_{\text{cvt}} \eta_0 \\ T_{\text{mmin}}(n) \leq T_{\text{m}}(n) \leq T_{\text{mmax}}(n), \\ SOC_{\text{min}} \leq SOC \leq SOC_{\text{max}} \\ \omega_{\text{mmin}} \leq n_{\text{m}} \leq \omega_{\text{mmax}} \\ 0.442 \leq i_{\text{cvt}} \leq 2.432 \end{cases}$$

纯电动模式下,动力系统以系统效率为优化目标:

$$\max \eta_{\text{sys}}(i_{\text{cvt}}, T_{\text{m}}), \quad (9)$$

式中 n_{m} 为电动机转速; T_{cvtin} 为 CVT 输入轴转矩; i_{cvt} , η_{cvt} 为 CVT 速比和效率; i_0 , η_0 为减速器速比和效率; $T_{\text{mmin}}(n)$, $T_{\text{mmax}}(n)$ 为当转速为 n 时,电动机外特性所对应转矩的最小和最大转矩; SOC_{max} , SOC_{min} 为电池 SOC 允许放电的最大值和最小值。

电量消耗模式下基于系统效率的控制策略的优化流程,具体见图6。

3 系统效率优化结果及仿真实验

3.1 电消耗模式下系统优化结果

基于上述的系统效率优化模型,经过计算可得到不同加速度、车速下的系统效率,以及在系统效

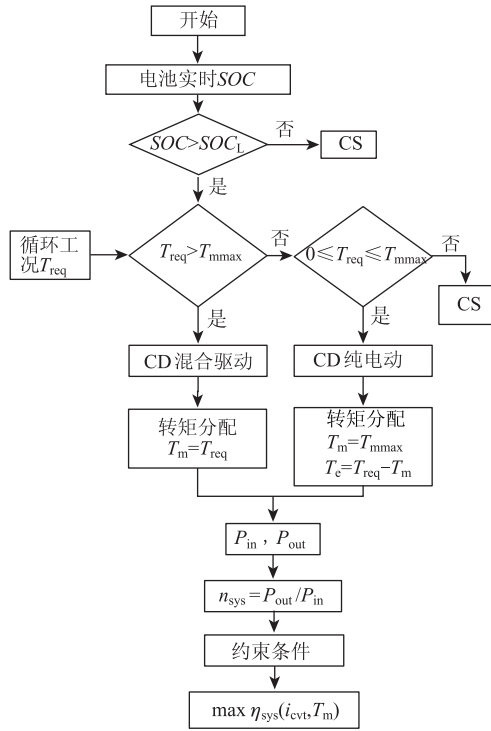


图6 系统效率优化流程图

Fig. 6 Flowchart of system efficiency optimization

率最优时所对应的电动机最优转矩和 CVT 目标速比, 并拟合成相应的控制 MAP, 如图 7 ~ 图 9 所示。

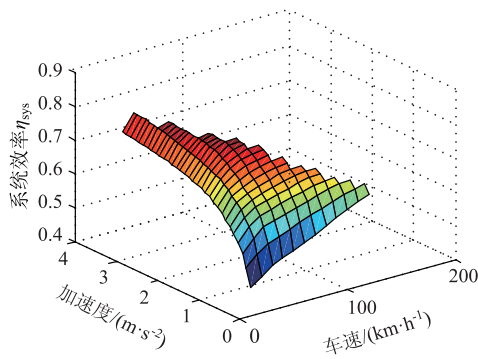


图7 纯电动模式的系统效率

Fig. 7 System efficiency in pure electric mode

3.2 电消耗模式仿真试验及结果分析

采用 Matlab/Simulink 仿真平台建立整车的仿真模型, 并将上述所获得的控制 MAP 嵌入控制策略, 在新欧洲行驶循环 (New European Driving Cycle, NEDC) 工况下针对 PHEV 电量消耗模式下利用系统效率最优的能量管理策略进行验证。本插电式混合动力系统应用的具体整车参数与关键部件的参数如表 2 所示。

在这里以行驶续航里程作为衡量经济性能评价指标。以电池 SOC = 0.9 为仿真初始值并行驶 10 个

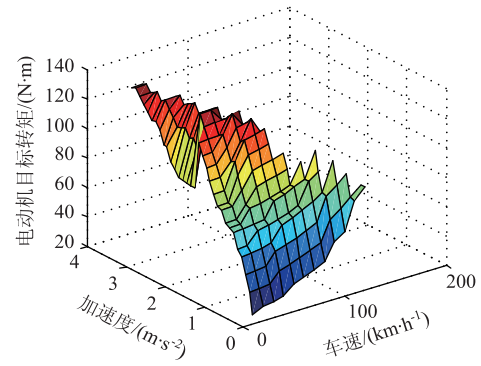


图8 纯电动模式的驱动电机目标控制转矩

Fig. 8 Target control torque of driving motor in pure electric mode

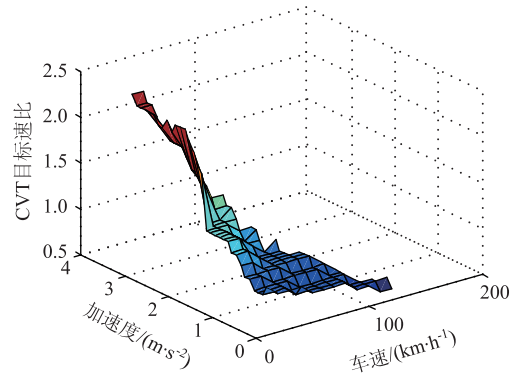


图9 纯电动驱动模式下的 CVT 目标控制速比

Fig. 9 Target control speed ratio of CVT in pure electric mode

NEDC 循环工况, 由插电式混合动力系统的特色可知, 当电池 SOC 值低于 0.3 则由电量消耗模式进入电量保持模式。

为了说明基于系统效率优化的电量保持模式能量管理策略的优势, 将优化后与优化前采用直观式逻辑门限的电量保持控制策略进行对比, 其仿真结果见图 10 所示, 优化前的纯电动续航里程为 70.8 km, 优化后续航里程为 81.7 km, 由此简单得知, 采用系统效率优化后的续航里程比直观式逻辑门限控制提升了 10.9 km, 其经济性能提高了 15.3%。

对于整个行驶过程中的发动机、ISG 电机、驱动电机, 以及 CVT 最优速比随时间的转矩分配见图 11 所示。由图 11 分析可知, 在 PHEV 行驶 9 000 s 内, 车辆处于电量消耗的纯电动驱动模式, 之后当遇到较大的需求转矩时, 发动机参与驱动, 车辆处于电量消耗的混合驱动模式; 随着电池 SOC 值低于电池阈值时, PHEV 进入了电量保持模式, 这时转矩分配均满足控制策略的需要。

表 2 PHEV 动力部件参数
Tab. 2 Powertrain parameters of PHEV

参数		数值
整车参数	整车质量 m/kg	1 520
	迎风面积 A/m^2	2.13
	车轮滚动半径 r/m	0.289
	滚动阻力系数 f	0.008 3
	风阻系数 C_d	0.357
汽油机	最大功率 $P_{\text{emax}}/\text{kW}$	63
	最大转矩 $T_{\text{emax}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	150@4 000
	转速范围 $n_e/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	800 ~ 6 000
电动机	峰值功率 P_m/kW	32
	最大转矩 $T_{\text{mmax}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	160
	转速范围 $n_m/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	0 ~ 6 000
ISG	峰值功率 P_{ISG}/kW	24
	最大转矩 $T_{\text{ISGmax}}/(\text{N} \cdot \text{m})$	110
	转速范围 $n_{\text{ISG}}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	0 ~ 6 000
电池	容量 $Q_0/(\text{A} \cdot \text{h})$	51
	额定电压 U_0/V	320
CVT	速比范围 i_{cvt}	0.422 ~ 2.432
减速器	主减速比 i_0	5.297

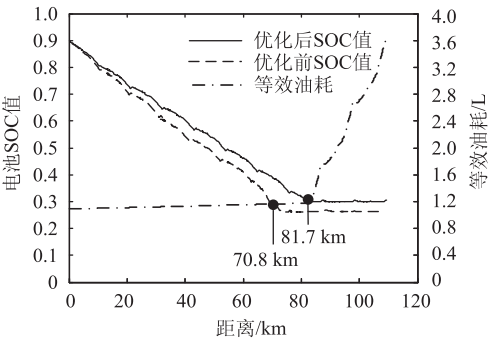


图 10 电池 SOC 值, 等效油耗曲线
Fig. 10 Curves of SOC and equivalent fuel consumption of battery

4 结论

(1) 以插电式混联式 CVT 混合动力汽车的动力系统为研究对象, 以提升电消耗模式下的燃油经济性能为目标, 开展制订了基于系统效率的电量消耗能量管理策略。为验证所制订电消耗控制策略的有效性, 基于 matlab/Simulink 建立仿真模型进行仿真试验。

(2) 在 NEDC 工况下采用基于系统效率最优的电量消耗模式能量管理策略进行验证, 其结果表明采用系统效率的优化方法比直观式逻辑具有

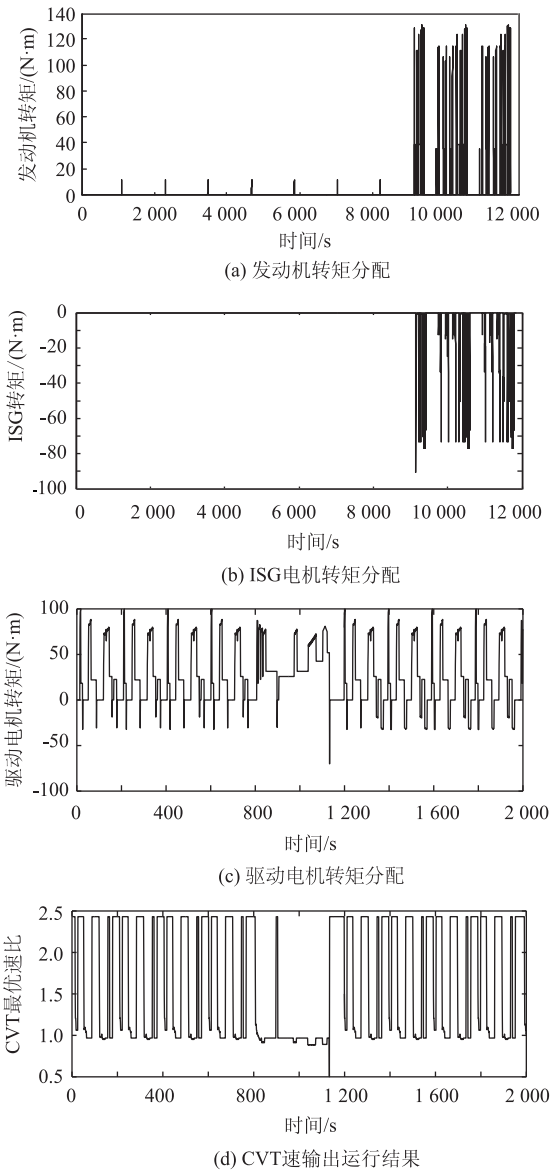


图 11 各关键动力部件循环工况仿真结果
Fig. 11 Simulation result of key power components under driving cycle

明显的优势, 其续航里程提升 10.9 km, 即经济性提高了 15.3%, 从而说明所制订的控制策略的有效性。

参考文献:
References:

[1] 王欣, 李高, 朱万力, 等. 并联混合动力汽车能量管理建模及优化研究 [J]. 控制工程, 2014, 21 (3): 357 - 360.
WANG Xin, LI Gao, ZHU Wan-li, et al. Modeling and Optimization Simulation on Energy Management of PHEV [J]. Control Engineering of China, 2014, 21 (3):

- 357-360.
- [2] ZHANG C, VAHID A. Real-time Optimal Control of Plug-in Hybrid Vehicles with Trip Preview [C] // 2010 American Control Conference. Baltimore: IEEE, 2010.
- [3] MONTAZERI-GH M, MAHMOODI-K M. An Optimal Energy Management Development for Various Configuration of Plug-in and Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of Central South University, 2015, 22 (5): 1737-1747.
- [4] FENG T H, YANG L, GU Q, et al. A Supervisory Control Strategy for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Based on Energy Demand Prediction and Route Preview [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (5): 1691-1700.
- [5] 秦大同, 赵新庆, 苏岭, 等. 插电式混合动力汽车变参数能量管理策略 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (2): 112-118.
- QIN Da-tong, ZHAO Xin-qing, SU Ling, et al. Variable Parameter Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (2): 112-118.
- [6] CORDOBA-ARENAS A, ONORI S, GUEZENNEC Y, et al. Capacity and Power Fade Cycle-life Model for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-ion Battery Cells Containing Blended Spinel and Layered-oxide Positive Electrodes [J]. Journal of Power Sources, 2015, 278: 473-483.
- [7] BANVAIT H, ANWAR S. A Rule Based Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle [C] // Proceedings of American Control Conference. St. Louis: IEEE, 2009: 3938-3943.
- [8] CHEN Z, FU Y h, MI C C, et al. State of Charge Estimation of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles Using Extended Kalman Filtering [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62 (3): 1020-1030.
- [9] LEE H, KIM H. Improvement in Fuel Economy for a Parallel Hybrid Electric Vehicle by Continuously Variable Transmission Ratio Control [J]. Journal of Automobile Engineering, 2002, 219 (3) 45-68.
- [10] LI S G, SHARKH S M, WALSH F C, et al. Energy and Battery Management of a Plug-in Series Hybrid Electric Vehicle Using Fuzzy Logic [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60: 3571-3585.
- [11] DATONG Q, TAO D, YANG Y, et al. Regenerative Braking Simulation Research for CVT Hybrid Electric with ISG Based on Forward Modeling [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 1199 (5): 618-624.
- [12] 杨军平, 王歆誉, 蔡源春, 等. 基于系统效率最优的 CVT 电动汽车再生制动策略 [J]. 湖南科技大学学报, 2014, 29 (4): 23-27.
- YANG Jun-ping, WANG Xin-yu, CAI Yuan-chun, et al. Regenerative Braking Strategy Research for Electric Vehicle with Continuously Variable Transmission Based on Optimal System Efficiency [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2014, 29 (4): 23-27.
- [13] AGHAEI J, NEZHAD A E, RABIEE A, et al. Contribution of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Power System Uncertainty Management [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 450-458.
- [14] MALAIZE J, TONA P. Optimization-based Control Design for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicle [C] // Proceedings of 2011 Vehicle Power and Propulsion Conference. New York: IEEE, 2011: 1-7.
- [15] 任勇, 郑永霞, 苏岭, 等. 基于系统效率最优的 CVT 混合动力轿车转矩优化分配方法 [J]. 汽车实用技术, 2012 (7): 1-6.
- REN Yong, ZHENG Yong-Xia, SU Ling, et al. Torque Optimal Distribution Method for Hybrid Electric Vehicles with CVT based on Maximum System Efficiency [J]. Automobile Technology, 2012 (7): 1-6.
- [16] 孙四军. 基于混合动力系统效率的发动机工作点的控制 [J]. 汽车工程, 2012, 34 (3): 207-210.
- SUN Si-jun. The Control of Engine Operation Points Based on Hybrid Power System Efficiency [J]. Automotive Engineering, 2012, 34 (3): 207-210.
- [17] 连静, 韩虎, 李琳辉, 等. 基于传动系统效率最优的混合动力汽车控制策略研究 [J]. 大连理工大学学报, 2013, 53 (5): 666-671.
- LIAN Jing, HAN Hu, LI Lin-hui, et al. Research on HEV Control Strategy Based on Optimal Efficiency of Drive System [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53 (05): 666-671.
- [18] SEZER V, GOKASAN M, BOGOSYAN S. A Novel ECMS and Combined Cost Map Approach for High-efficiency Series Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2011, 60 (8): 3557-3570.