

# 基于系统效率的 PHEV 动力与控制参数优化\*

秦大同<sup>1†</sup>, 林毓培<sup>1,2</sup>, 刘星源<sup>1</sup>, 罗松<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400700)

**摘要:**针对搭载无级变速器的单电机插电式混合动力汽车,提出了一种新的动力参数与控制参数设计方法,建立插电式混合动力汽车各工作模式的系统效率模型,得到基于系统效率的工作模式切换规律,并对模式切换曲线乘以控制参数以实现模式切换规律的调整。充分考虑燃油经济性的影响因素,以动力源功率、电池数目以及主减速器速比作为动力系统设计参数。利用 Matlab/Simulink 建立整车经济性仿真模型,构建“城市-城郊-高速-城郊-城市”综合行驶工况,以降低等效燃油消耗为目标,采用遗传算法对插电式混合动力汽车动力系统参数与模式切换规律控制参数进行综合优化。结果表明:采用本文所提出的方法能够优化出一组合理的动力与控制系统参数,使整车等效燃油消耗更低,比优化前的百公里等效油耗降低了 7.2%。

**关键词:**插电式混合动力汽车;参数优化;遗传算法;效率模型;综合工况;模式切换

**中图分类号:**U462.3+4

**文献标志码:**A

## Optimization of Power and Control Parameters for PHEV Based on System Efficiency

QIN Datong<sup>1†</sup>, LIN Yupei<sup>1,2</sup>, LIU Xingyuan<sup>1</sup>, LUO Song<sup>1</sup>

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

2. School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** According to single-motor plug-in hybrid electric vehicle with Continuous Variable Transmission (CVT), a novel design method of power and control parameters was proposed. The system efficiency model for each mode of Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) was built, the mode switching rules based on system efficiency was then obtained, and the adjustment of the mode switching rules through multiplying the mode switching curve with control parameters was realized. Fully considering the influencing factors of fuel economy, the power source, battery number and final drive ratio were regarded as the power parameters. By using Matlab/Simulink, the vehicle economy simulation model was built, and "City-Suburban-Highway-Suburban-City" comprehensive driving conditions were constructed taking the reduction of the equivalent fuel consumption as the optimization target. The PHEV dynamic parameters and controlling parameters of mode switching rules were optimized under the comprehensive driving cycle by using Genetic Algorithm (GA). The result demonstrates that, by using the method proposed in this paper, a set of

\* 收稿日期:2017-03-30

基金项目:国家科技支持项目(2013BAG12B01), The National Key Technologies R&D Program of China(2013BAG12B01)

作者简介:秦大同(1956-),男,重庆北碚人,重庆大学教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail: dtqin@cqu.edu.cn

reasonable power and control system parameters can be optimized to lower the vehicle equivalent fuel consumption, where the equivalent fuel consumption per 100 km can be reduced by 7.2% when compared with that of non-optimization cases.

**Key words:** PHEV; parameters optimization; genetic algorithm; efficiency model; comprehensive driving cycle; mode switch

插电式混合动力汽车可以通过公共电网对电池进行外接充电,大大降低了车辆对燃油的依赖性,具有续航里程长、排放低的显著优点<sup>[1]</sup>.目前,混合动力汽车参数优化主要包括动力系统参数优化、控制系统参数优化、动力系统参数与控制系统参数综合优化.王庆年提出一种以整车制造成本和年均使用成本为评价指标的动力系统参数匹配方法<sup>[2]</sup>,Tan G 采用免疫遗传算法对传动系统参数进行多目标优化<sup>[3]</sup>,但未考虑控制系统参数对汽车能耗经济性的影响;李军、邓元望分别采用遗传算法对其逻辑门限控制参数与模糊策略控制规则进行优化<sup>[4-5]</sup>,但忽略了动力系统参数与控制系统参数的相互影响;詹森、王润才以发动机特性曲线作为设计控制系统参数的基础对动力系统与控制系统参数进行综合优化<sup>[6-7]</sup>,但没有综合考虑发动机、电机、电池对控制系统参数的影响.邓涛、曾育平分别将电池数目与电池容量作为动力系统参数,在单一工况下对动力系统参数和控制系统参数进行多目标优化<sup>[8-9]</sup>,然而,单一工况下的参数优化结果不具有普遍适应性,且电池容量及数目的改变势必影响整车重量.诸多研究都忽略了电池重量对能耗经济性和整车重量及成本的影响,所以对包括电池重量在内的动力系统参数优化是很有必要的,同时,在车辆燃油经济性优化过程中选择合理的控制参数也尤为重要.

针对上述研究存在的不足,本文提出了一种新的插电式混合动力汽车动力与控制参数设计方法.通过对各个工作模式下系统效率的优化得到最佳效率图,以系统效率最佳为依据制定模式切换规律,并将模式切换规律曲线作为设计控制系统参数的基础.充分考虑发动机、电机及动力电池等动力系统参数对能耗经济性和整车重量及成本的影响,构建由典型工况组成的综合工况,基于遗传算法对动力传动系统参数和模式切换规律控制系统参数进行综合寻优,得到可使插电式混合动力汽车实现最佳能耗经济性的动力系统参数及控制系统参数.

## 1 整车性能指标

本文研究对象是由某公司开发的 CVT 单电机插电式混合动力汽车,其动力系统结构如图 1 所示.

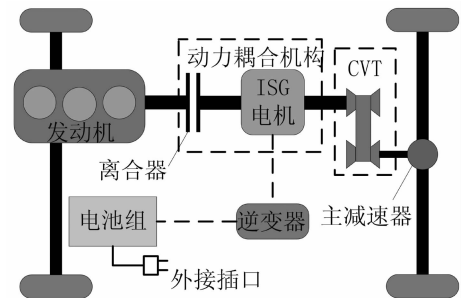


图 1 动力传动系统结构简图

Fig. 1 Structure of PHEV's power system

动力系统采用单轴并联式结构,发动机通过离合器与 ISG 电机相连,发动机和电机均可单独工作,ISG 电机可工作于转矩补偿或者充电状态.能量管理策略采用电量消耗(CD, Charge Depleting)与电量维持(CS, Charge Sustaining)模式,汽车初始工作于 CD 阶段,直到电池电量下降至某一目标值后进入 CS 阶段,此后电池电量在一定范围内波动. CD 阶段包括纯电动驱动模式和混合动力驱动模式,CS 阶段包括纯电动驱动模式、纯发动机驱动模式、混合动力模式驱动以及行车充电模式.汽车动力性指标如表 1 所示.

车辆动力系统的输出功率需要满足车辆行驶的动力性指标,即最高车速、最大爬坡度和车辆加速度<sup>[10]</sup>.

$$P_{t \max} = \max(P_{u \max}, P_{i \max}, P_{a \max}) \quad (1)$$

式中: $P_{t \max}$ 为车辆最大需求功率; $P_{u \max}$ 为最高车速时汽车需求功率; $P_{i \max}$ 为最大爬坡度时需求功率; $P_{a \max}$ 为加速时最大需求功率.

通过理论计算法<sup>[11]</sup>对动力系统参数进行匹配,匹配结果如表 2 所示.

表1 插电式混合动力汽车动力性能指标  
Tab.1 Power parameters of PHEV

参数	数值
最高车速(纯电动) $v_{mmax}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	120
最高车速(混合动力) $v_{hmax}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	180
0—50 km/h 加速时间(纯电动) $t_m/\text{s}$	10
0—100 km/h 加速时间(混动) $t_h/\text{s}$	15
15 km/h 最大爬坡度(纯电动) $a_m/\%$	30
40 km/h 最大爬坡度(混动) $a_h/\%$	30
续航里程(纯电动) $l/\text{km}$	50
-----	
整车质量(不含电池) $m_0/\text{kg}$	1 700
迎风面积 $A/\text{m}^2$	2.28
风阻系数 $C_D$	0.32
车轮半径 $r/\text{m}$	0.295
滚动阻力系数 $f_r$	0.0135
-----	
单节电池电压 $U/\text{V}$	3.2
电池容量 $Q/(\text{Ah})$	30
单节电池质量 $m_b/\text{kg}$	1.2

表2 理论计算法匹配结果  
Tab.2 Matching results of theoretical calculation method

动力参数	匹配结果
电机功率 $P_{ISG}/\text{kW}$	35
发动机功率 $P_{IC}/\text{kW}$	65
主减速器速比 $i_0$	5.4
电池数目 $N$	120

## 2 系统效率分析

按照逻辑门限规则<sup>[12]</sup>对动力源转矩进行分配,搭建各工作模式效率优化模型,并以工作效率最佳为依据制定模式切换规律,作为能量管理策略控制参数的确定依据。

纯电动工作模式下由电机单独驱动车辆,发动机关闭,离合器分离,发动机无转动惯量.其系统效率表达式为

$$\eta_1 = \frac{\left( \frac{F + J_m i_0^2 i_g \eta_T u}{r^2} \frac{di_{cvt}}{dt} \right) u + P_{aux}}{T_m \omega_m / (\eta_m \eta_{bat-disch})} \quad (2)$$

$$F = m_0 g f_r \cos \alpha + m_0 g \sin \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u^2 + \delta m_0 \frac{du}{dt} \quad (3)$$

$$\delta = 1 + \frac{J_w}{m_0 r^2} + \frac{J_m i_{cvt}^2 i_0^2 \eta_T}{m_0 r^2} \quad (4)$$

式中: $\eta$ 为整车系统效率; $m_0$ 为整车质量与电池质量之和; $u$ 为车速; $T_m$ 为电机转矩; $\omega_m$ 为电机转速; $\delta$ 为质量旋转系数; $J_w$ 为车轮转动惯量; $P_{aux}$ 为辅助功率; $J_m$ 为电机转动惯量; $i_0$ 为主减速器速比; $f_r$ 为滚动阻力系

数; $\eta_T$ 为传动效率; $r$ 为车轮半径; $A$ 为迎风面积; $i_{cvt}$ 为CVT速比; $C_D$ 为风阻系数; $\alpha$ 为爬坡度; $g$ 为重力加速度; $\eta_{bat-disch}$ 为电池放电效率; $\eta_m$ 为电机效率。

同理,通过对各不同模式工作特性的分析,建立各工作模式的整车效率模型。

纯发动机驱动模式下发动机单独驱动车辆行驶,但电机与发动机同轴,均有转动惯量,此时有

$$\eta_2 = \frac{\left( F + \frac{(J_m + J_e) i_0^2 i_g \eta_T u}{r^2} \frac{di_{cvt}}{dt} \right) u + P_{aux}}{T_e \omega_e / \eta_e} \quad (5)$$

式中: $T_e$ 为发电机转矩; $\omega_e$ 为发电机转速; $\eta_e$ 为发电机效率; $J_e$ 为发电机转动惯量。

行车充电工作模式下发动机单独驱动车辆,同时为动力电池充电,有

$$\eta_3 = \frac{\left( F + \frac{(J_e + J_m) i_0^2 i_{cvt} \eta_T u}{r^2} \frac{di_{cvt}}{dt} \right) u + P_{bat} \eta_{bat-ch} + P_{aux}}{T_e \omega_e / \eta_e} \quad (6)$$

式中: $P_{bat}$ 为电池功率; $\eta_{bat-ch}$ 为电池充电效率.CD混合驱动模式下发动机与电机同时驱动车辆,电池电量来源于外部电网,有

$$\eta_4 = \frac{\left( F + \frac{(J_e + J_m) i_0^2 i_{cvt} \eta_T u}{r^2} \frac{di_{cvt}}{dt} \right) u + P_{aux}}{T_e \omega_e / \eta_e + T_m \omega_m / (\eta_m \eta_{bat-disch})} \quad (7)$$

式中: $\eta_{bat-disch}$ 为电池放电效率.CS混合驱动模式下发动机与电机同时驱动车辆,电池电量来源于行车充电,有

$$\eta_5 = \frac{\left( F + \frac{(J_e + J_m) i_0^2 i_{cvt} \eta_T u}{r^2} \frac{di_{cvt}}{dt} \right) u + P_{aux}}{T_e \omega_e / \eta_e} - \frac{T_m \omega_m / (\eta_m \eta_{bat-disch})}{T_e \omega_e / \eta_e} \quad (8)$$

式(9)为效率模型约束条件

$$\begin{aligned} 0 &\leq \omega_m \leq \omega_{max} \\ 0 &\leq \omega_e \leq \omega_{max} \\ 0 &\leq T_e \leq T_{emax} \\ -T_{mmax} &\leq T_m \leq T_{mmax} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $T_{emax}$ 为发电机最大转矩; $\omega_{emax}$ 为发电机最高转速; $T_{mmax}$ 为电机最大转矩。

基于以上效率公式采用 Matlab/ Simulink 建立效率模型,对其进行优化仿真,得到各工作模式的效率图,如图2所示。

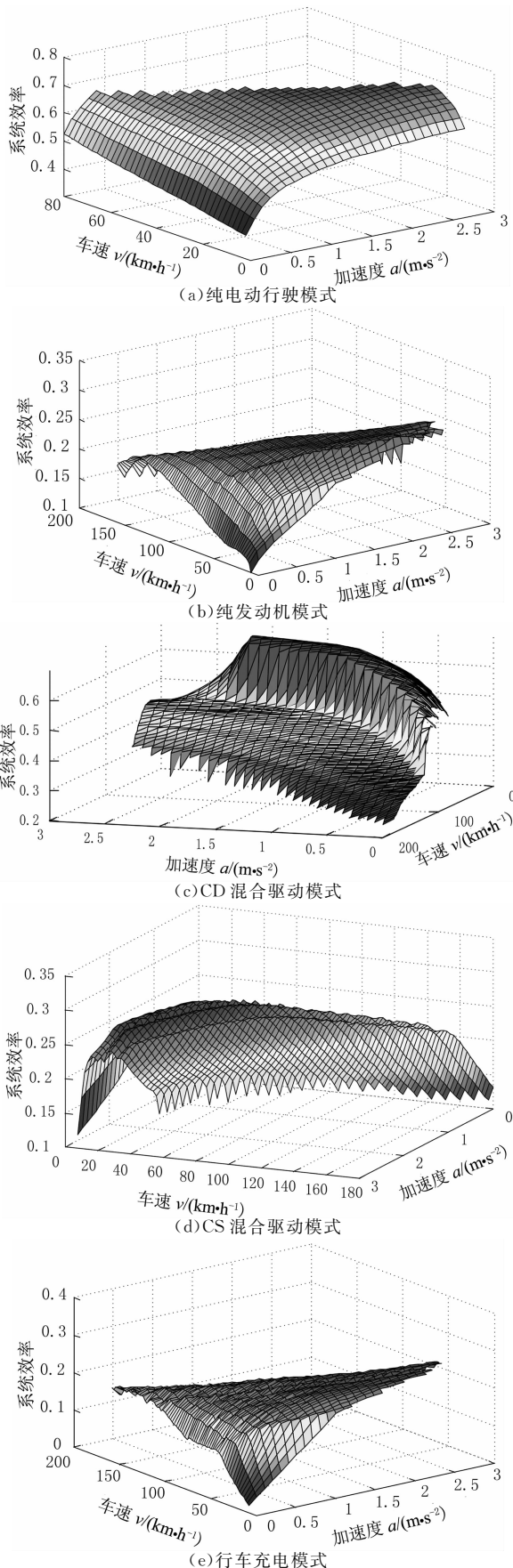


图 2 各工作模式效率图

Fig. 2 Efficiency diagram of each working mode

对 CD 阶段和 CS 阶段各工作模式效率图进行对比分析,将系统效率在“车速-加速度”平面上投影,以工作效率最高作为依据划分工况区域,得到模式切换规律,如图 3 所示.然而,在动力系统参数优化过程中,系统效率会随着动力系统参数的改变而发生变化,模式切换规律需要随即调整以适应系统效率的变化,所以对模式切换曲线分别乘以控制参数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  以实现模式切换规律的自适应调整.

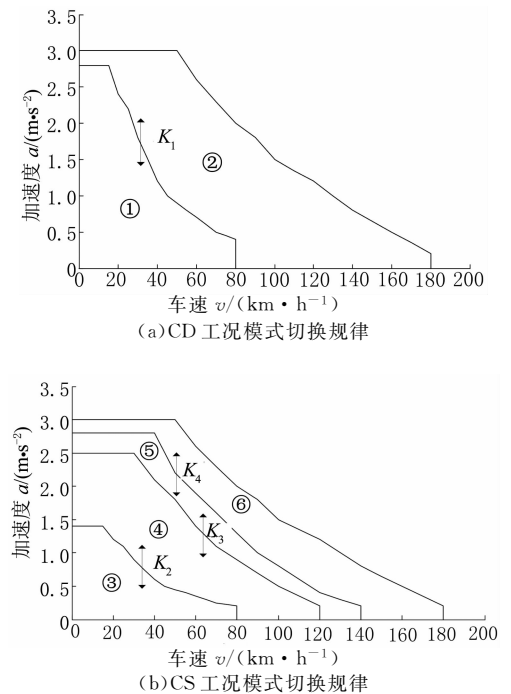


图 3 工况区域划分图

Fig. 3 Figure of Working area division

图 3 中,①代表 CD 纯电动模式;②代表 CD 混合驱动模式;③代表 CS 纯电动模式;④代表行车充电模式;⑤代表 CS 发动机模式;⑥代表 CS 混合驱动模式.  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  为调整模式切换规律的控制参数.

### 3 基于遗传算法的优化模型

#### 3.1 优化目标

本文中插电式混合动力汽车参数优化的目标是在保证动力性满足要求的前提下,合理使用外部充电电能,使汽车燃油消耗量最低.以汽车行驶百公里等效燃油消耗<sup>[13]</sup>为优化目标,其表达式为

$$\begin{cases} \min F(X) = 100 \cdot \frac{\int_0^t (m_e(X) + m_m(X)) dt}{\int_0^t v dt} \\ m_m(X) = \begin{cases} \alpha \frac{P_{bat}}{H \cdot \eta_{bat-disch} \eta_m}, \text{放电时} \\ \alpha \frac{P_{bat}}{H} \eta_{bat-ch}, \text{充电时} \end{cases} \\ \alpha = \frac{3.6 \times 10^6}{\eta_e H \eta_T \eta_{bat-ch}} \\ X = [X_1, X_2] \\ X_1 = [P_{IC}, P_{ISG}, i_0, N] \\ X_2 = [SOC_{obj}, \Delta SOC, K_1, K_2, K_3, K_4] \\ X_i^L \leq X \leq X_i^U, i = 1, 2, \dots, m \\ g_j(X) \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

式中： $m_e$ 为某时刻燃油率； $m_m$ 为电池吸收或释放的能量转换为燃油率； $\alpha$ 为油电平均转换效率，即将电机消耗能量转换为燃油消耗的等效系数； $X_1$ 为动力传动系统参数构成的向量； $X_2$ 为控制参数构成的向量； $P_{IC}$ 为发动机功率； $P_{ISG}$ 为ISG电机功率； $N$ 为电池数量，表征动力电池组重量及容量； $i_0$ 为主减速器速比； $SOC_{obj}$ 为目标电池电量； $\Delta SOC$ 为电池电量波动值； $K_1、K_2、K_3、K_4$ 为模式切换规律控制系数； $X_i^U$ 和 $X_i^L$ 为优化变量的上下限； $H$ 为燃油热值，取46 000 kJ/kg； $g_j(X)$ 为约束条件。

### 3.2 优化变量

以理论计算法匹配的动力系统参数值作为动力参数优化初值，控制参数 $K_1、K_2、K_3、K_4$ 初值均设为1，除电池电量外，其余控制参数均取初始值的50%~150%作为参数优化区间，考虑电池使用寿命，并能最大限度利用电池能量，以0.2作为电池SOC使用下限，以0.3作为 $SOC_{obj}$ 初值<sup>[11]</sup>，其优化区间如表3所示。

表3 优化变量取值区间  
Tab.3 Value ranges of optimal variables

优化变量	优化初值	下限值	上限值
发动机功率 $P_{IC}$ /kW	65	32.5	97.5
ISG电机功率 $P_{ISG}$ /kW	35	17.5	52.5
主减速器速比 $i_0$	5.4	2.7	8.1
电池数目 $N$	120	60	180
控制参数 $K_1$	1	0.5	1.5
控制参数 $K_2$	1	0.5	1.5
控制参数 $K_3$	1	0.5	1.5
控制参数 $K_4$	1	0.5	1.5
目标电池电量 $SOC_{obj}$	0.3	0.25	0.35
电量波动值 $\Delta SOC$	0.1	0.02	0.1

### 3.3 优化约束

以整车动力性能要求为PHEV参数优化的约束条件，约束表达式如下：

1) 纯电动工作模式

$$\text{最高车速: } g_{v_{max}}(X) \geq 120 \text{ km/h} \quad (11)$$

$$\text{加速时间: } g_{t_{0-50}}(X) \leq 10 \text{ s} \quad (12)$$

$$\text{最大爬坡度: } g_{i_{max(15)}}(X) \geq 30\% \quad (13)$$

$$\text{行驶里程: } g_{l_{max}} \geq 50 \text{ km} \quad (14)$$

2) 混合动力模式

$$\text{最高车速: } g_{v_{max}}(X) \geq 180 \text{ km/h} \quad (15)$$

$$\text{加速时间: } g_{t_{0-50}}(X) \leq 15 \text{ s} \quad (16)$$

$$\text{最大爬坡度: } g_{i_{max(40)}}(X) \geq 30\% \quad (17)$$

## 4 仿真分析

### 4.1 综合工况的建立

选取代表不同行驶环境的几种典型工况构成综合行驶工况。循环工况采用“市区-城郊-高速-城郊-市区”模式构建复合工况，该工况涵盖了NYCC、UDDS、HWFET三种分别代表市区、城郊、高速的行驶工况，如图4所示。

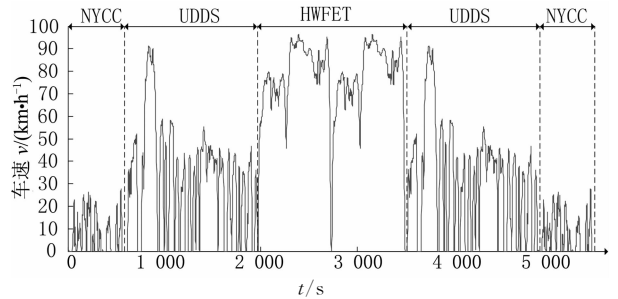


图4 综合工况时间-速度图  
Fig.4 Time-velocity of comprehensive driving cycle

### 4.2 参数优化结果

选取初始种群规模(Population Size)为100，交配概率(Crossover Fraction)为0.8，变异概率(Migration Fraction)为0.2，进化代数(Generations)选取50，添加线性约束，在综合工况下进行仿真优化。

适应度函数的优化过程如图5所示，随着遗传代数的增加，适应度值不断收敛，超过60代后趋于平稳，该值即最佳适应度值，此时优化得到的参数结果如表4所示。在满足约束条件下，电机功率和发动机功率较理论匹配方法均有所减少，避免了功率的浪费；同时，动力电池数目减少了16节，即电池重量减轻19.2 kg。

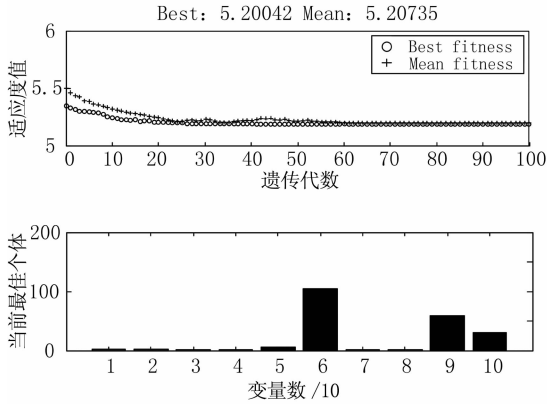


图 5 遗传优化结果图

Fig. 5 Results of GA optimization

表 4 参数优化结果

Tab. 4 Results of parameters optimization

优化参数	优化初值
发动机功率 $P_{IC}/kW$	59
ISG 电机功率 $P_{ISG}/kW$	31
主减速器速比 $i_0$	5.25
电池数目 $N$	104
控制参数 $K_1$	0.88
控制参数 $K_2$	0.98
控制参数 $K_3$	1.16
控制参数 $K_4$	0.85
目标电池电量 $SOC_{obj}$	0.25
电量波动值 $\Delta SOC$	0.04

4.3 仿真结果对比分析

优化前后的实际油耗对比如图 6 所示,优化后实际油耗较优化前明显降低.优化前后的电池电量变化曲线如图 7 所示,从图 7 中可以看出,电池电量初始值选择 0.85,优化前后汽车均能工作于电量消耗(CD)阶段和电量维持(CS)阶段,说明构建的综合工况达到了仿真优化的要求.图 8 和图 9 所示为优化前后发动机工作点分布图,通过对比可以得到优化后的发动机工作点较优化前更为集中,且主要分布于高效率区.

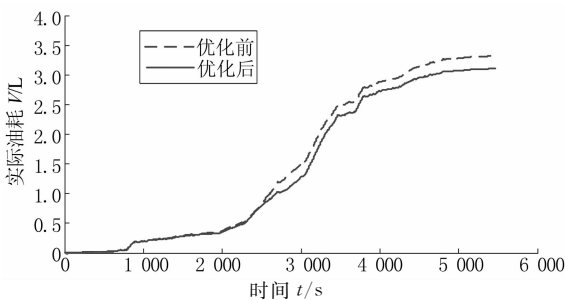


图 6 优化前后实际油耗对比图

Fig. 6 The actual fuel consumption comparison before and after optimization

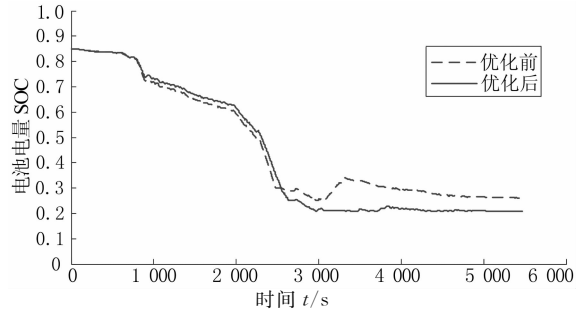


图 7 优化前后电量消耗对比图

Fig. 7 The electricity consumption comparison before and after optimization

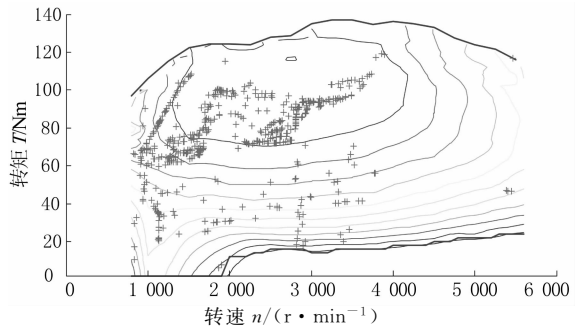


图 8 优化前发动机工作点

Fig. 8 Engine operating point before optimization

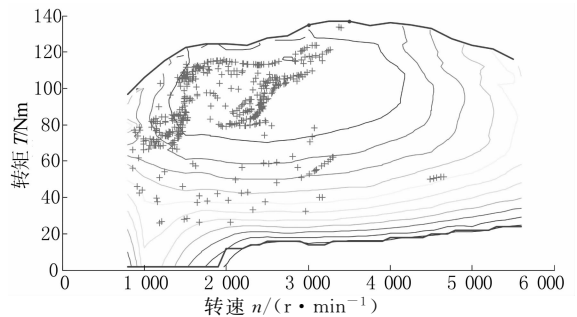


图 9 优化后发动机工作点

Fig. 9 Engine operating point after optimization

通过计算得到百公里等效油耗对比如表 5 所示,相比于优化前的百公里等效油耗,采用本文提出的参数设计方法后,百公里等效油耗降低了 7.2%.

表 5 等效油耗对比

Tab. 5 Equivalent fuel consumption comparison

工况	说明	百公里等效油耗 $V_{100}/L$
综合工况	优化前	5.61
综合工况	优化后	5.2

## 5 结 论

1)充分考虑能耗经济性诸多影响因素,以逻辑门限能量管理策略为基础,建立整车系统效率模型,通过各工作模式系统效率的对比分析,制定行车过程中模式切换规律,作为控制参数的优化基础。

2)构建“城市-城郊-高速-城郊-城市”综合行驶工况,对动力系统及控制系统参数进行综合优化.优化后的动力源功率、电池数目均有减少,降低了整车重量及成本.基于 Matlab/Simulink 建立整车仿真模型,对两种参数设计方法进行仿真对比分析,结果表明:采用本文提出的方法能够优化出一组合理的动力系统参数及控制参数,使汽车等效燃油消耗更低。

3)相比于优化前,采用本文提出的参数设计方法优化后,发动机工作点更加集中于高效率区,但是效果仍然不够理想,需要在本文研究基础上进一步开展能量管理策略的优化研究。

## 参考文献

- [1] 周云山, 贾杰锋, 李航洋, 等. CVT 插电式混合动力汽车经济性控制策略[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(8): 25-31.  
ZHOU Y S, JIA J F, LI H Y, *et al.* Economical control strategy for a plug-in hybrid electric vehicle equipped with CVT [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(8):25-31. (In Chinese)
- [2] 王庆年, 王光平, 王鹏宇, 等. 基于成本优化的插电式混合动力参数匹配[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(2):340-347.  
WANG Q N, WANG G P, WANG P Y, *et al.* Parameter matching for plug-in hybrid electric vehicle based on cost optimization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(2):340-347. (In Chinese)
- [3] TAN G, LIN C, BAI Y, *et al.* Multi-objective optimization of HEV transmission system parameters based on immune genetic algorithm [C]// IEEE International Conference on Communication Problem-Solving. IEEE, 2015.
- [4] 李军, 朱亚洲, 徐杨蛟, 等. 混合动力汽车动力传动系统控制策略优化研究[J]. 机械设计与制造, 2014(3):138-141.  
LI J, ZHU Y Z, XU Y J, *et al.* Research on control strategy optimization in power train transmission system of hybrid electric vehicle[J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(3): 138-141. (In Chinese)
- [5] 邓元望, 王兵杰, 张上安, 等. 基于混沌遗传算法的 PHEV 能量管理策略优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(4):42-48.  
DENG Y W, WANG B J, ZHANG S A, *et al.* Optimization of energy management strategy of PHEV based on chaos-genetic algorithm[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2013, 40(4):42-48. (In Chinese)
- [6] 詹森, 秦大同, 曾育平. 基于多循环工况的混合动力汽车参数优化研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(8):922-928.  
ZHAN S, QIN D T, ZENG Y P. A study on the parameter optimization of hybrid electric vehicle based on multiple driving cycles[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(8):922-928. (In Chinese)
- [7] 王润才, 何仁, 俞剑波, 等. 基于遗传算法的插电式串联混合动力汽车动力参数优化[J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2544-2549.  
WANG R C, HE R, YU J B, *et al.* Parameter optimization of PSHEV based on genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18):2544-2549. (In Chinese)
- [8] 邓涛, 林椿松, 李亚南, 等. 采用 NSGA-II 算法的混合动力能量管理控制多目标优化方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10):143-150.  
DENG T, LIN C S, LI Y N, *et al.* A multi-objective optimization method for energy management control of hybrid electric vehicles using NSGA-II algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10):143-150. (In Chinese)
- [9] 曾育平, 秦大同, 苏岭, 等. 插电式混合动力汽车动力系统的成本、油耗和排放多目标参数优化[J]. 汽车工程, 2016, 38(4):397-402.  
ZENG Y P, QIN D T, SU L, *et al.* Cost, fuel consumption and emission multi-objective parameter optimization for the power train of a plug-in HEV[J]. Automotive Engineering, 2016,38(4):397-402. (In Chinese)
- [10] 赵新庆. 基于 CVT 的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.  
ZHAO X Q. Study on energy management strategy for plug-in hybrid electrical vehicle with CVT[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (In Chinese)
- [11] 武小兰, 王军平, 曹秉刚, 等. 充电式混合动力电动汽车动力系统的参数匹配[J]. 汽车工程, 2008, 30(12):1095-1098.  
WU X L, WANG J P, CAO B G, *et al.* Parameter matching of power train in a plug-in hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(12):1095-1098. (In Chinese)
- [12] 卢立来. 基于路况信息预测的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.  
LU L L. Research on energy management for plug-in hybrid electric vehicle based on prediction of driving conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (In Chinese)
- [13] 崔纳新, 步刚, 吴剑, 等. Plug-In 并联式混合动力汽车实时优化能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11):155-160.  
CUI N X, BU G, WU J, *et al.* Real-time optimization of energy management strategy for plug-in parallel hybrid electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26(11):155-160. (In Chinese)