

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.06.001

# 搭载回流式动力传动系统的 PHEV 参数优化

孙冬野, 陈 元, 范曾雁

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对搭载回流式动力耦合传动系统的插电式混合动力汽车(PHEV, plug-in hybrid electric vehicle),提出了一种参数匹配优化设计方法。建立了整车各个模式下的等效输入功率模型,根据最小等效输入功率原则制定了各驱动模式间的切换规律,并设置控制参数系数对模式切换曲线进行调整。通过 MATLAB/SIMULINK 构建了整车经济性仿真模型,利用遗传算法对匹配的动力参数和控制参数系数进行了综合优化。仿真结果比较表明:此方法得到的一组参数能有效提升燃油经济性,百公里等效燃油消耗比优化前降低了 4.8%。

**关键词:**回流式耦合动力传动系统;插电式混合动力汽车;等效输入功率;参数优化

中图分类号:U462.34

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)06-001-12

## Optimization of PHEV parameters with reflux power coupling transmission system

SUN Dongye, CHEN Yuan, FAN Zengyan

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** A parametric matching optimization design method is proposed for plug-in hybrid vehicles equipped with the reflux power coupling transmission system. The equivalent input power model for each mode of the vehicle is established. Based on the principle of minimum equivalent input power, the switching rules between different driving modes are established, and the control parameter coefficients are set to adjust the mode switching curve. The economic simulation model of the whole vehicle is built by MATLAB/SIMULINK, and the matching dynamic parameters and control parameter coefficients are optimized by genetic algorithm. The simulation results show that the set of parameters obtained by this method can improve fuel economy effectively, and the equivalent fuel consumption per 100 km is reduced by 4.8% after optimization.

**Keywords:** reflux coupled power transmission system; plug-in hybrid electric vehicle; equivalent input power; parameter optimization

收稿日期:2019-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875055);国家重点科研项目(2016YFB0101402)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51875055) and National Key Research and Development Program of China(2016YFB0101402).

作者简介:孙冬野(1966—),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事汽车自动变速传动及混合动力传动理论的研究,  
(E-mail)dysun@cqu.edu.cn。

插电式混合动力汽车 PHEV(plug-in hybrid electric vehicle)<sup>[1]</sup>可以通过外界电网充电补充自身电池的电量消耗,降低了对汽油的依赖,使其具有低能耗、低排放及高性价比等特点,成为目前最具产业化和市场前景的电动汽车之一<sup>[2]</sup>。笔者研究的是搭载了回流式动力耦合传动系统的插电式混合动力汽车,该系统使用电控电动金属带式 CVT(continuously variable transmission)行星排的结构,功率通过行星排的分流,小部分经过 CVT 调速回流。该结构与丰田公司的 THS(Toyota hybrid system)系统<sup>[3]</sup>相比,使用电控 CVT 回流取代了其发电机-电池-电动机构成的“电回流”结构,使能量利用率更高,具有更大的速比范围和低速承载能力强的特点。

目前,对于插电式混合动力汽车的参数优化问题,国内外的学者都做了很多研究。Zhang 等<sup>[4]</sup>根据车辆动力性要求对双模式纯电动系统参数进行了匹配,并利用遗传算法优化,通过与蚁群算法优化结果比较,证明提高了经济性。Mozaffari 等<sup>[5]</sup>以混动版 Prius 为研究对象,利用仿真实验的数据建立仿真模型,利用同步自学习的帕累托策略和非主导排序精英遗传算法来对参数进行优化,提高了整车经济性。秦大同等<sup>[6]</sup>利用庞特里亚金极小值原理,以燃油和电能消耗的成本之和为优化目标,对控制参数进行优化仿真使燃油经济性得到了提高。Li 等<sup>[7]</sup>将 NSAG-II 算法应用于动力分流式插电式混合动力汽车的优化问题,降低了汽车的燃油消耗和运行成本。Kang 等<sup>[8]</sup>提出了一种利用齿轮代替变速器的新型 PHEV 传动结构,并对该结构的部件尺寸进行了优化,得到最佳的尺寸组合来提高经济性。韩立金等<sup>[9]</sup>对功率分流混合动力汽车提出了参数匹配方法,并对动力性参数进行了优化。王庆年等<sup>[10]</sup>利用最优拉丁超立方设计方法探索了其传动系统所有因子的空间响应特性,给出了最优局部区域,在最优局部区域内利用非线性二次规划算法得到了传动系参数全局最优组合以及对应的百公里行驶成本。Zeng 等<sup>[11]</sup>以电力系统成本和车辆动力性能指标为约束条件,发动机冷热效应的燃油消耗和排放量作为优化目标,利用标准遗传算法和量子遗传算法两种方法对电力系统参数和控制策略参数进行了优化,发现量子遗传算法得到的结果更好。王润才等<sup>[12]</sup>针对插电式串联混合动力汽车以整车设计要求的动力性能指标为约束条件,以整车百公里燃油消耗量和排放性能为目标函数,建立了 PSHEV(plug-in split hybrid electric vehicle)动力参数优化的仿真模型,实现了对 PSHEV 动力系统部件参数和控制策略参数的同时优化。Hu 等<sup>[13]</sup>提出将燃料电池的能量管理策略与燃料电池的尺寸和氢气敏感性等参数相结合,利用凸规划使燃料电池的寿命显著增加且成本有所降低。陈峥等<sup>[14]</sup>对 PHEV 的电力系统利用遗传算法,以整车质量和动态性能为约束,进行了成本优化,得到了合理的匹配参数。但上述文献均把动力参数和控制参数分开优化,未考虑单一种类参数的变化可能导致另一种类参数不是最优。针对以上研究的不足,笔者对搭载了回流式动力耦合传动系统的混合动力汽车进行了综合参数匹配优化设计。利用遗传算法对其动力参数和控制参数系数进行综合优化,提高了燃油经济性,为研究回流式动力耦合传动系统这种新型结构的参数匹配和优化方法提供了参考。

## 1 整车动力性能指标

研究对象是搭载了回流式动力耦合传动系统的插电式混合动力汽车,回流式动力耦合传动系统结构如图 1 所示。

动力耦合传动系统采用同轴并联式结构,发动机通过离合器  $L_1$  和电动机相连,通过控制  $L_1$  的结合和闭合来实现发动机的单独工作。采用混合控制电量消耗(CD, charge depleting)与电量维持(CS, charge sustaining)的能量管理策略,汽车在电池剩余电量(SOC, state of charge,公式和表中用  $S_{oc}$ 表示)较高时工作于 CD 模式,以电机为主要的动力源,发动机进行转矩补偿;当 SOC 降低至某一标准值后进入 CS 模式,以发动机为主要动力源,电机进行转矩补偿或充电,使 SOC 在一定范围内波动。整车动力性能指标如表 1 所示。

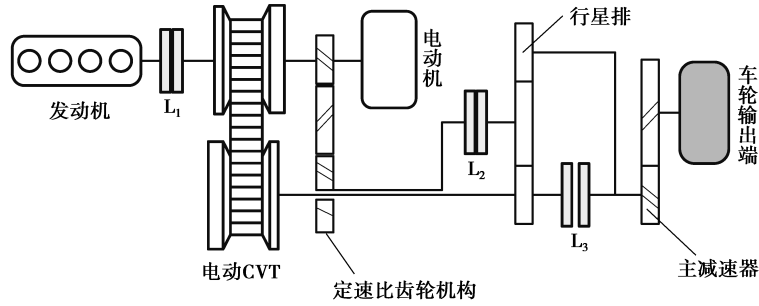


图 1 回流式动力耦合传动系统结构图

Fig. 1 Structure of reflux power coupling transmission system

表 1 整车动力性能指标

Table 1 Power parameters of vehicle

最高车速(纯电动) $v_{mmax}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	0~50 km/h 加速时间 (纯电动) $t_m/\text{s}$	15 km/h 最大爬坡度 (纯电动) $\alpha_m/\%$	续航里程(纯电动) $L/\text{km}$
100	3.5	30	70
最高车速 (混动) $v_{hmax}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	0~100 km/h 加速时间 (混动) $t_h/\text{s}$	40 km/h 最大爬坡度 (混动) $\alpha_h/\%$	整车质量 $m_k/\text{kg}$
180	8	30	1525
迎风面积 $A/\text{m}^2$	风阻系数 $C_D$	滚动阻力系数 $f$	车轮半径 $r_r/\text{m}$
1.746	0.25	0.02	0.308
单节电池电压 $U/\text{A}$	电池容量 $Q/(\text{A} \cdot \text{h})$	单节电池质量 $m_b/\text{kg}$	
3.6	85	1.8	

为了满足整车动力性能指标,需要整车在最高车速、汽车加速及最大爬坡度时的输出功率满足需求功率,即

$$P_{\max} = \max(P_{v_{\max}}, P_{a_{\max}}, P_{\alpha_{\max}}), \tag{1}$$

式中: $P_{\max}$ 为车辆最大需求功率; $P_{v_{\max}}$ 为最高车速时汽车需求功率; $P_{a_{\max}}$ 为加速时最大需求功率; $P_{\alpha_{\max}}$ 为最大爬坡度时需求功率。

通过理论算法对整车动力参数行进匹配。选用的速比范围为 0.498~2.502 的金属带传动装置,其轴间距为 140 mm,通过轴间距确定定速比齿轮结构的传动比  $i_f$ ,根据理论算法计算的整车最大最小速比,并确定行星排结构参数  $\alpha$  和主减速器速比  $i_0$ 。动力系统参数匹配结果如表 2 所示。

表 2 动力系统参数匹配结果

Table 2 Matching results of power system parameters

电机功率 $P_m/\text{kW}$	发动机功率 $P_e/\text{kW}$	行星排结构 参数 $i_f$	定速比齿轮机构 速比 $\alpha$	主减速器 速比 $i_0$	电池数目 $N_{\text{bat}}$
60	65	3.174	2.470	3.750	98

## 2 系统最小等效输入功率分析

回流式动力耦合传动系统自身拥有回流模式和纯金属带模式两种模式,其功率流如图 2 所示。

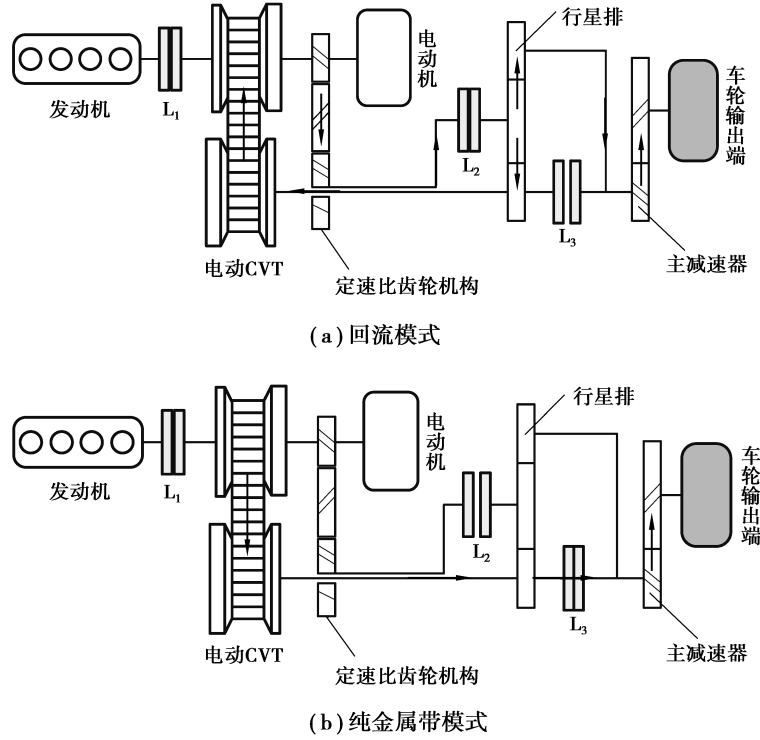


图 2 回流式动力耦合传动系统功率流向图

Fig. 2 Power flow of reflux power coupling transmission system

回流模式下离合器  $L_3$  断开,通过控制  $L_1$  的闭合和断开来控制是由发动机或电机单独驱动或者发动机和电机组驱动。动力源产生的功率将先经过定速比齿轮机构,由行星排进行分流,大部分的功率流将由齿圈传到减速器再输出给车轮;小部分的功率流将通过太阳轮传递给电控 CVT,再与动力源产生的功率汇流,形成回流。

纯金属带模式离合器  $L_2$  断开,  $L_3$  闭合,动力源控制方式同回流模式。动力源产生的功率流将直接通过金属带传递给减速器再由车轮输出。

在不同的模式下,动力源的组成不同,根据逻辑门限规律来对动力源转矩进行分配。搭建各模式下的等效输入功率优化模型,根据最小的等效输入功率来制定模式切换规律,作为能量管理策略的控制参数。

纯电动驱动模式下由电机单独作为动力源驱动车辆,发动机不工作,  $L_1$  断开,发动机无转动惯量。回流式耦合传动系统的等效输入功率的方程式为

$$\begin{cases} \left( T_m - I_m \frac{d\omega_m}{dt} \right) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}} i_0 = \sum T_{\text{req}} + \sum I_r \frac{d\omega_r}{dt} \\ \sum T_{\text{req}} = mgf \cos \theta r_r + mg \sin \theta r_r + \frac{C_D A v^2}{21.15} r_r + m \frac{dv}{dt} r_r, \\ \omega_m = i_{\text{sys}} i_0 \omega_r = i_{\text{sys}} i_0 \frac{v}{r_r}, \\ P_{\text{equ}} = P_b = \frac{P_m}{\eta_m \eta_{\text{batd}}} = \frac{v T_m i_{\text{sys}} i_0}{r_r \eta_m \eta_{\text{batd}}}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_m, T_{\text{req}}$  分别为电机和当前车速下的车轮处的需求转矩;  $I_m, I_r$  分别为电机和车轮处的转动惯量;  $\omega_m, \omega_r$  分别为电机和车轮处的转速;  $i_{\text{sys}}, i_0$  分别为回流式耦合传动系统和主减速器的速比;  $\eta_{\text{sys}}, \eta_m, \eta_{\text{batd}}$  分别为回流式耦合传动系统、电机和电池放电的效率;  $r_r$  为车轮半径;  $m$  为整车质量;  $g$  为重力加速度;  $f$  为滚动阻力系数;  $\theta$  为爬坡度;  $C_D$  为风阻系数;  $A$  为迎风面积;  $v$  为车速;  $P_{\text{equ}}, P_b, P_m$  分别为等效输入、电池和电机功率。

回流式耦合传动系统处于回流模式或是纯金属带模式由系统本身的速比决定,而不同模式时其速比和效率表达式是不同的,即



$$i_{\text{sys}} = \begin{cases} \frac{\alpha i_f i_{\text{cvt}}}{(1 + \alpha) i_{\text{cvt}} - i_f}, i_{\text{sys}} > 2.47; \\ i_{\text{cvt}}, i_{\text{sys}} \leq 2.47. \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \begin{cases} \frac{(1 + \alpha) i_{\text{cvt}} - i_f}{(1 + \alpha) i_{\text{cvt}} - i_f \eta_{\text{cvt}}}, \eta_{\text{sys}} > 2.47; \\ \eta_{\text{cvt}}, \eta_{\text{sys}} \leq 2.47. \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)(3)(4)可得到纯电动驱动模式等效输入功率表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{equ1}} = \frac{v}{\eta_m \eta_{\text{batd}} \eta_{\text{sys}}} \left( a_1 + b_1 \frac{dv}{dt} + c_1 \frac{di_{\text{sys}}}{dt} \right), \\ a_1 = mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v^2}{21.15}, \\ b_1 = m + \frac{\sum I_r}{r_r^2} + \frac{I_m \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}}^2 i_0^2}{r_r^2}, \\ c_1 = \frac{I_m \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}} i_0^2 v}{r_r^2}. \end{cases} \quad (5)$$

根据上述的等效输入功率公式,利用 Matlab/Simulink 建立等效输入功率模型,并对其进行优化仿真得到最小的等效输入功率,进而得到回流式动力耦合传动系统在纯电动驱动模式下的系统速比,回流式动力耦合传动系统系统速比如图 3 所示。

同理,通过对各个不同模式的动力学方程进行分析,建立各模式的等效输入功率模型。

CD 混合驱动模式下  $L_1$  闭合,由电机为主要动力源,发动机补偿扭矩。可以得到 CD 混合驱动模式等效输入功率表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{equ2}} = \frac{T_m \omega_m}{\eta_m \eta_{\text{batd}}} + \frac{T_e \omega_e}{\eta_e}, \\ T_m + T_e = \frac{v}{\eta_m \eta_{\text{sys}}} \left( a_2 + b_2 \frac{dv}{dt} + c_2 \frac{di_{\text{sys}}}{dt} \right), \\ a_2 = mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v^2}{21.15}, \\ b_2 = m + \frac{\sum I_r}{r_r^2} + \frac{(I_m + I_e) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}}^2 i_0^2}{r_r^2}, \\ c_2 = \frac{(I_m + I_e) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}} i_0^2 v}{r_r^2}. \end{cases} \quad (6)$$

仿真后可以得到 CD 混合驱动模式的系统速比,如图 4 所示。

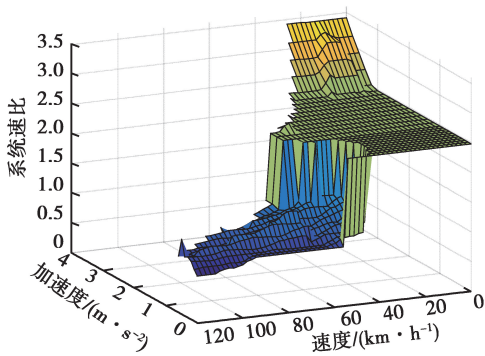


图 3 纯电动驱动模式系统速比

Fig. 3 System speed ratio of electric drive mode

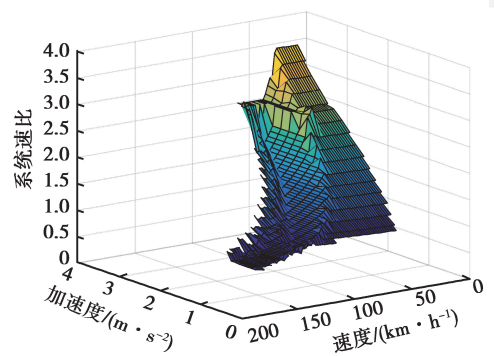


图 4 CD 混合驱动模式系统速比

Fig. 4 System speed ratio of CD hybrid drive mode

纯发动机驱动模式下  $L_1$  闭合,发动机单独驱动车辆,但与电机同轴,所以均有转动惯量。可以得到纯发动机驱动模式等效输入功率表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{equ3}} = \frac{v}{\eta_e \eta_{\text{sys}}} \left( a_3 + b_3 \frac{dv}{dt} + c_3 \frac{di_{\text{sys}}}{dt} \right), \\ a_3 = mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v^2}{21.15}, \\ b_3 = m + \frac{\sum I_r}{r_r^2} + \frac{(I_e + I_m) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}}^2 i_0^2}{r_r^2}, \\ c_3 = \frac{(I_e + I_m) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}} i_0^2 v}{r_r^2}. \end{cases} \quad (7)$$

仿真后可以得到纯发动机驱动模式的系统速比,如图 5 所示。

CS 混合驱动模式  $L_1$  闭合,发动机为主要动力源,电动机进行补偿。可以得到 CS 混合驱动模式等效输入功率表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{equ4}} = \frac{T_e \omega_e}{\eta_e} + \frac{T_m \omega_m}{\eta_m \eta_{\text{batd}}}, \\ T_m + T_e = \frac{v}{\eta_m \eta_{\text{sys}}} \left( a_4 + b_4 \frac{dv}{dt} + c_4 \frac{di_{\text{sys}}}{dt} \right), \\ a_4 = mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v^2}{21.15}, \\ b_4 = m + \frac{\sum I_r}{r_r^2} + \frac{(I_m + I_e) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}}^2 i_0^2}{r_r^2}, \\ c_4 = \frac{(I_m + I_e) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}} i_0^2 v}{r_r^2}. \end{cases} \quad (8)$$

仿真后可以得到 CS 混合驱动模式的系统速比,如图 6 所示。

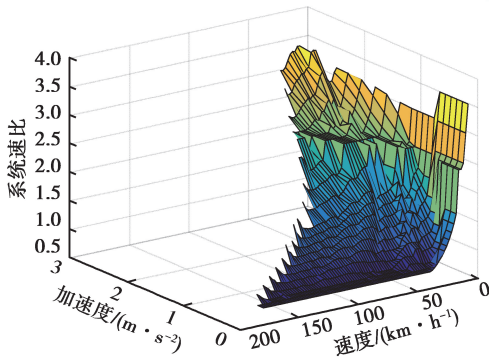


图 5 纯发动机驱动模式系统速比

Fig. 5 System speed ratio of engine drive mode

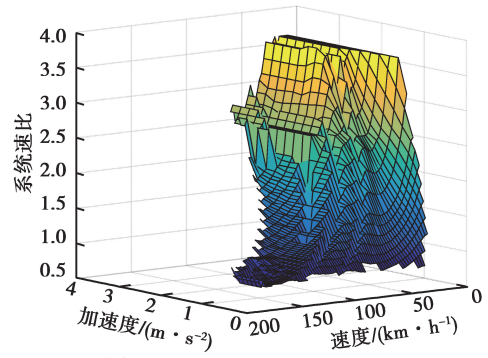


图 6 CS 混合驱动模式系统速比

Fig. 6 Systemspeed ratio of CS hybrid drive mode

CS 行车充电模式  $L_1$  闭合,发动机单独驱动车辆,电机进行充电,做负功。可以得到 CS 行车充电模式等效输入功率表达式为

$$\begin{cases} P_{\text{equ5}} = \frac{T_e \omega_e}{\eta_e} + T_m \omega_m \eta_m \eta_{\text{batc}}, \\ T_m + T_e = \frac{v}{\eta_m \eta_{\text{sys}}} \left( a_5 + b_5 \frac{dv}{dt} + c_5 \frac{di_{\text{sys}}}{dt} \right), \\ a_5 = mgf \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{C_D A v^2}{21.15}, \\ b_5 = m + \frac{\sum I_r}{r_r^2} + \frac{(I_m + I_e) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}}^2 i_0^2}{r_r^2}, \\ c_5 = \frac{(I_m + I_e) \eta_{\text{sys}} i_{\text{sys}} i_0^2 v}{r_r^2}. \end{cases} \quad (9)$$

仿真后可以得到行车充电模式的系统速比,如图 7 所示。

对 CD 和 CS 阶段进行分析,通过各个模式最小的等效输入功率比较,选取各模式间最小的等效输入功率,并在“速度-加速度”平面进行投影,得到模式切换规律,如图 8 所示。

图 8 中,1 区域是 CD 纯电动驱动模式,2 区域是 CD 混合驱动模式,3 区域是发动机转速低于怠速转速时的纯电动驱动模式,4 区域是 CS 纯电动驱动模式,5 区域是 CS 行车充电模式,6 区域是 CS 纯发动机驱动模式,7 区域是 CS 混合驱动模式。

而在整车动力参数的优化过程中,参数的变化会导致控制规律的变化,从而影响结果的精确性。所以设置了  $K_{cdm}$ ,  $K_{csm}$ ,  $K_{csx}$  和  $K_{cse}$  4 个控制参数系数,通过模式切换的规律曲线乘以控制参数系数,实现对模式切换规律曲线的调整。

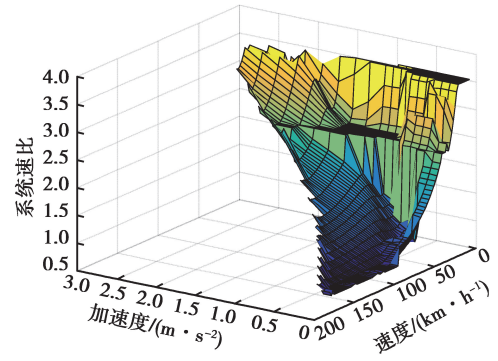
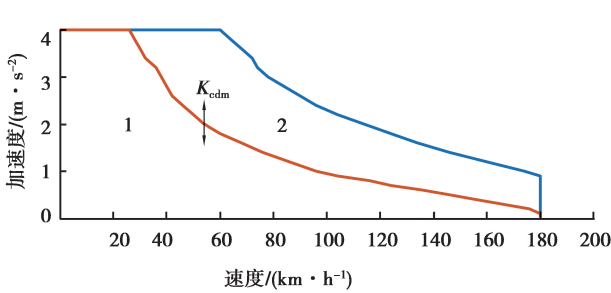
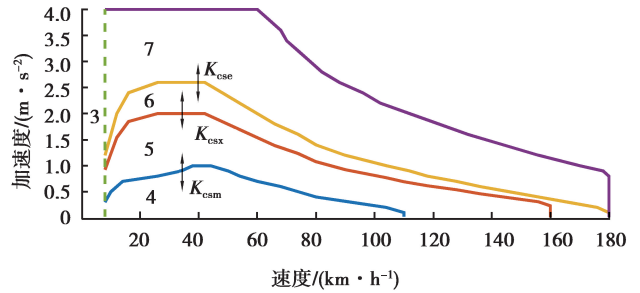


图 7 行车充电模式系统速比

Fig. 7 System speed ratio of vehicle chargingmode



(a) CD模式切换规律



(b) CS模式切换规律

图 8 工况区域划分图

Fig. 8 Working Area Divison

### 3 基于遗传算法的优化模型

#### 3.1 优化目标函数的确定

以动力性能指标为标准进行匹配,优化目标为车辆的经济性。即在保证动力性满足动力性指标的前提下,使整车通过外部电网获得的电能被充分合理地使用,降低整车的燃油消耗。以整车百公里等效燃油消耗<sup>[15]</sup>为优化目标,其表达式为

$$\begin{cases} F(x)_{\min} = 100 \frac{\int_0^t \left( f_{uel}(x) + \frac{Q_m(x)}{k} \right) dt}{\int_0^t v dt}, \\ \mathbf{X} = [X_1, X_2], \\ \mathbf{X}_1 = [K_{cdm}, K_{csm}, K_{csx}, K_{cse}], \\ \mathbf{X}_2 = [N_{bat}, S_{ocobj}, \Delta S_{oc}, P_{emax}, P_{mmax}], \\ X_i^l \leq X \leq X_i^u, i = 1, 2, \dots, n, \\ g_j(X) \geq 0, j = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $f_{uel}$  为某时刻的燃油消耗量;  $Q_m$  为某时刻的耗电量;  $k$  为油电的价格转换系数,即将消耗的电能按价格转化成同等价格的油耗;  $\mathbf{X}_1$  为控制模式切换规则的自适应变量组成的向量;  $\mathbf{X}_2$  为整车需优化的动力参数组成的向量;  $K_{cdm}$ ,  $K_{csm}$ ,  $K_{csx}$ ,  $K_{cse}$  为模式切换规律控制系数;  $N_{bat}$  为电池数目;  $S_{ocobj}$  为电池的目标电量;  $\Delta S_{oc}$  为电池电量的波动值;  $P_{emax}$  为发动机的最大功率;  $P_{mmax}$  为电机的最大功率。  $X_i^l$  和  $X_i^u$  分别为优化变量的上下

限值;  $g_j(X)$  为约束条件。

### 3.2 优化变量的处理

以匹配得到的各个参数的数值作为初值, 设置  $K_{cdm}$ ,  $K_{esm}$ ,  $K_{csx}$  和  $K_{cse}$  4 个系数的初值为 1, 以各个参数初值的 80%~120% 为优化区间的范围。为了保证电池效率较高, 并尽可能多地使用电池电量, 设置  $S_{ocobj}$  的初值为 0.2,  $\Delta S_{oc}$  初值为 0.05。参数优化区间如表 3 所示。

表 3 参数优化区间

Table 3 Parameter Optimization Interval

控制 参数	$K_{cdm}$			$K_{esm}$			$K_{csx}$			$K_{cse}$					
	初值	下界	上界	初值	初值	下界	上界	初值	初值	下界	上界	初值			
	1.0	0.8	1.2	1.0	1.0	0.8	1.2	1.0	1.0	0.8	1.2	1.0			
动力 参数	$N_{bat}$			$S_{ocobj}$			$\Delta S_{oc}$			$P_{e\max}/kW$			$P_{m\max}/kW$		
	初值	下界	上界	初值	下界	上界	初值	下界	上界	初值	下界	上界	初值	下界	上界
	98	79	118	0.20	0.15	0.25	0.05	0.02	0.10	65	52	78	60	48	72

### 3.3 约束条件的确立

以整车的动力性指标作为约束条件, 对整车进行优化, 优化条件表达式为

最高车速:

$$g_{vm\max}(X) \geq 100 \text{ km/h}, \quad (11)$$

$$g_{vh\max}(X) \geq 180 \text{ km/h}. \quad (12)$$

加速时间:

$$g_{t0-50}(X) \leq 3.5 \text{ s}, \quad (13)$$

$$g_{t0-100}(X) \leq 8 \text{ s}. \quad (14)$$

最大爬坡度:

$$g_{m\max(15)}(X) \geq 30\%, \quad (15)$$

$$g_{h\max(40)}(X) \geq 30\%. \quad (16)$$

续驶里程:

$$g_{L\max}(X) \geq 70 \text{ km}. \quad (17)$$

## 4 仿真分析

### 4.1 工况的建立

采用 WLTC 工况, 相较于原来推行的 NEDC 工况, WLTC 循环的循环里程更长, 加减速更激烈, 最高车速更高, 变工况更多, 同时覆盖更广泛的车辆运行工况, 如图 9 所示。

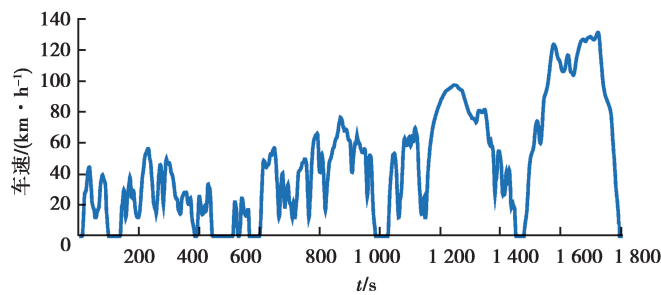


图 9 WLTC 工况循环图

Fig. 9 WLTC driving cycle

WLTC 循环工况里程为 23.27 km, 笔者以 5 段 WLTC 工况构成仿真工况。

### 4.2 参数优化结果

适应度函数的优化过程如图 10 所示。随着遗传代数的增加,适应度不断收敛,在 50 代以后趋于平稳,并最终得到优化参数的结果,如表 4 所示。在满足动力性参数指标的情况下,电池个数减少了 11 节,减轻了 19.8 kg;发动机和电机功率都有所下降,降低了多余能量的损失。

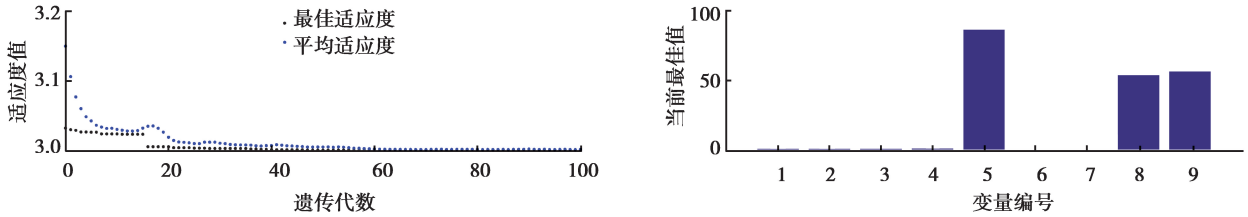


图 10 遗传优化结果图

Fig. 10 Results of GA optimization

表 4 优化参数结果

Table 4 Optimization Parameter Result

控制	$K_{cdm}$	$K_{csm}$	$K_{csx}$	$K_{cse}$	
参数	0.90	0.80	0.89	0.99	
动力	$N_{bat}$	$S_{ocobj}$	$\Delta S_{oc}$	$P_{emax}/kW$	$P_{mmax}/kW$
参数	87	0.19	0.03	54	57

### 4.3 优化仿真分析

通过仿真得到优化前和优化后的 5 个 WLTC 工况的实际燃油消耗,其结果如图 11 所示。可以看出,优化前的油耗要高于优化后的油耗。整车处于 CD 模式,优化前后油耗之差变化较为平稳;进入 CS 模式后,可以看出优化后参数的效果比较显著,节油明显,但是由于 SOC 波动范围变小,在制动时,油耗节省效果稍差,之后又稳步上升,证明了方法的正确性。

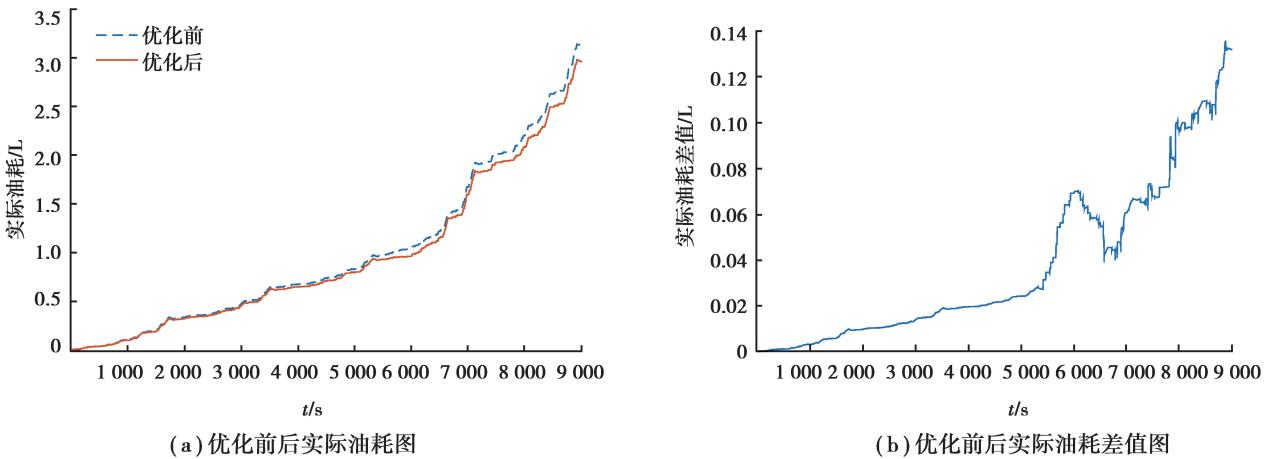
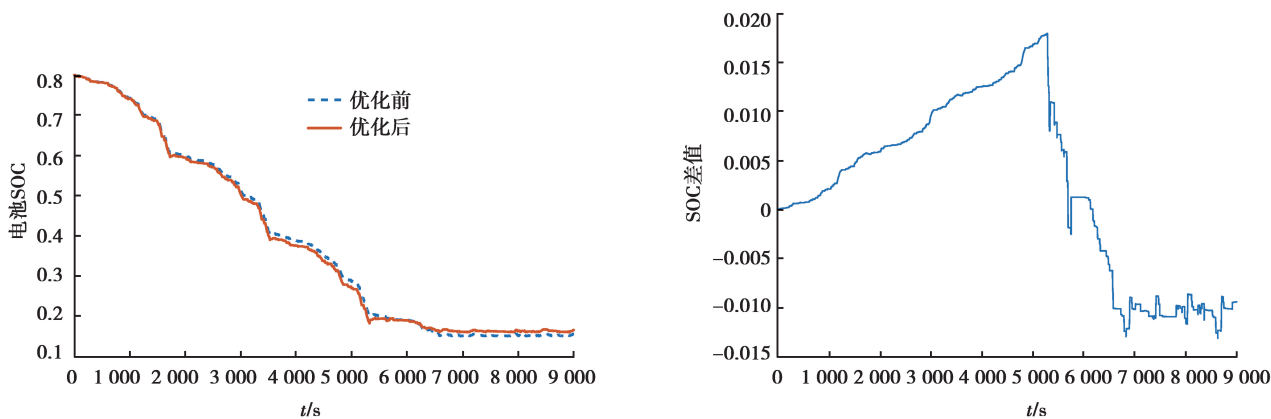


图 11 实际油耗对比图

Fig. 11 Actual fuel consumption difference before and after optimization

电池电量消耗对比如图 12 所示。优化后电池 SOC 在 CD 段下降得更快,优先使用电池中从外界电网获得的电量;在 CS 段电池 SOC 保持得较高,波动更小,减少了充电时的能量损失。





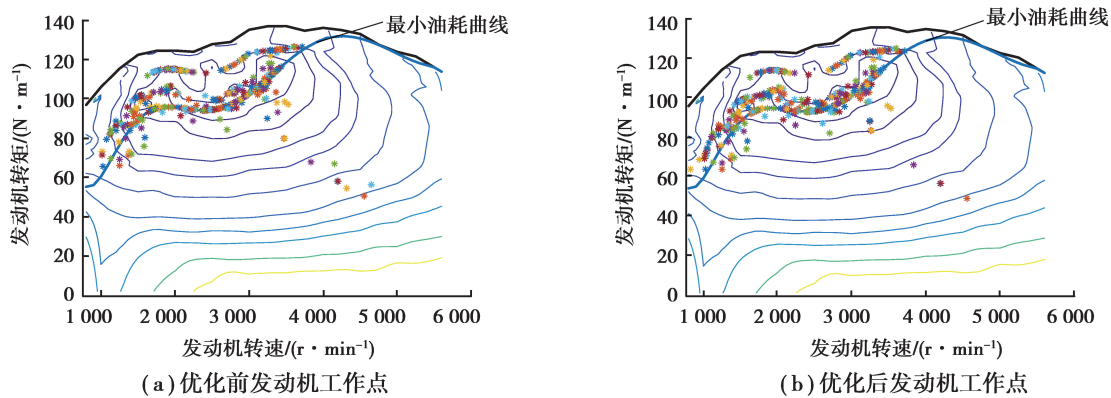
(a) 优化前后SOC图

(b) 优化前后SOC差值图

图 12 电池 SOC 对比图

Fig. 12 Battery SOC comparison

从图 13 可以看出,优化后的发动机工作点更集中于发动机最小油耗曲线,使发动机工作在更高效的区间,减少了效率低时的油耗浪费,提高了燃油经济性。



(a) 优化前发动机工作点

(b) 优化后发动机工作点

图 13 发动机工作点对比图

Fig. 13 Engine operating point Comparison

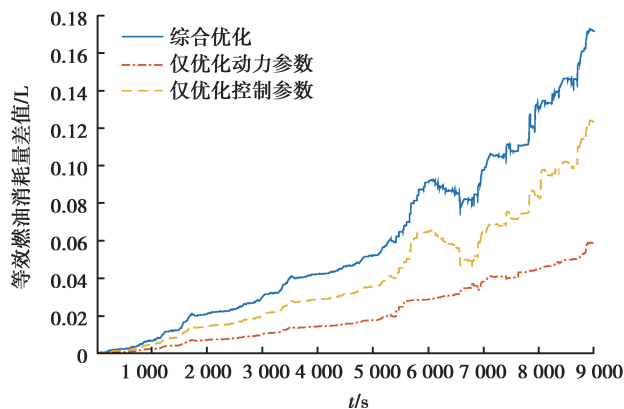


图 14 优化前后等效燃油消耗差值图

Fig. 14 Differencechart of equivalentfuel consumption before and after optimization

从图 14 中可以看出,对于本文所用的结构,仅优化动力参数或仅优化控制参数对整车经济性的均有所提升,且仅优化控制参数的效果更明显,说明调整模式切换规律,使发机电机工作在效率更高的模式下更有助于提升经济性。而将动力参数和控制参数进行综合优化寻到同时最优的点,对于经济型的提升效果最为突出,证明了综合优化这一方法的有效性。

比较优化前后等效百公里油耗,如表 5 所示,通过计算得到,百公里等效燃油消耗降低了 4.8%。

表 5 等效燃油消耗对比

优化状态	百公里等效燃油消耗/L
优化前	3.15
优化后	3.00

## 5 结 论

1) 根据提出的回流式动力耦合传动系统,通过理论匹配法进行匹配,作为动力参数优化的结果;充分考虑对经济性动力性的影响因素,以最小等效输入功率为原则,在基于规则的能量管理策略的基础上,制定各工作模式的切换规律,作为控制参数的优化基础。

2) 考虑到参数优化时,动力参数的变化会导致控制规律的改变,将动力参数和控制参数进行综合优化,使优化结果更加合理。利用 MATLAB/SIMULINK 对仿真模型进行仿真,对优化前后的结果进行比较,发现利用本文的优化方法进行优化得到的油耗更低,证明了优化方法的有效性。

3) 与优化前相比,采用得到的发动机工作点虽然相对集中,但是不够理想,需要进一步地对控制策略这一方向展开研究。

### 参考文献:

- [1] 杨亚联,蒲斌,胡晓松,等.ISG型速度耦合混合动力系统全局最优控制方法[J].重庆大学学报,2013,36(9):71-77.  
YANG Yalian, PU Bin, HUXiaosong, et al. Study on global optimization control strategy of ISG velocity coupling hybrid electric vehicle[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(9): 71-77. (in Chinese)
- [2] 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 Yunshan, JIA Jiefeng, LI Hangyang, et al. Economic 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)
- [3] Liu J, Peng H, Filipi Z. Modeling and analysis of the toyota hybrid system[C]// Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 24-28, 2005, Monterey, California, USA. IEEE, 2005: 134-139.
- [4] Zhang L P, Li L, Qi B N, et al. Parameters optimum matching of pure electric vehicle dual-mode coupling drive system[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(11): 2265-2277.
- [5] Mozaffari A, Vajedi M, Chehresaz M, et al. Multi-objective component sizing of a power-split plug-in hybrid electric vehicle powertrain using Pareto-based natural optimization machines [J]. Engineering Optimization, 2016, 48(3): 361-379.
- [6] 秦大同,杨官龙,刘永刚,等.插电式混合动力汽车能耗优化控制策略的研究[J].汽车工程,2015,37(12):1366-1370,1377.  
QIN Datong, YANG Guanlong, LIU Yonggang, et al. A research on energy consumption optimization control strategy for plug-in hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(12): 1366-1370, 1377. (in Chinese)

- [7] Li Y H, Lu X M, Kar N C. Rule-based control strategy with novel parameters optimization using NSGA-II for power-split PHEV operation cost minimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3051-3061.
- [8] Kang C, Lee H, Kim J, et al. Component size and gear ratio optimization in PHEV powertrain[C]// 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), July 11-14, 2017, Los Angeles, CA, USA .IEEE, 2017: 1614-1618.
- [9] 韩立金,刘辉,王伟达,等.功率分流混合动力汽车参数匹配与优化研究[J].汽车工程,2014,36(8):904-910.  
HAN Lijin, LIU Hui, WANG Weida, et al. A study on the parameter matching and optimization of a power split HEV[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(8): 904-910. (in Chinese)
- [10] 王庆年,段本明,王鹏宇,等.插电式混合动力汽车动力传动系参数优化[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(1):1-7.  
Wang Qingnian, Duan Benming, Wang Pengyu, et al. Optimization of powertrain transmission parameters of plug-in hybrid electric vehicle [J]. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2017, 47(1): 1-7.
- [11] Zeng Y P. Parameter optimization of plug-in hybrid electric vehicle based on quantum genetic algorithm[J/OL]. Cluster Computing, 2018:1-9. (2018-03-12)[2019-01-15]. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2424-4>.
- [12] 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 Runcai, HE Ren, YU Jianbo, et al. Parameter optimization of a PSHEV based on genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2544-2549. (in Chinese)
- [13] Hu X S, Murgovski N, Johannesson L M, et al. Optimal dimensioning and power management of a fuel Cell/Battery hybrid bus via convex programming[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(1): 457-468.
- [14] 陈峥,潘二东,申江卫,等.基于遗传算法的 PHEV 动力参数优化与仿真[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2016, 41(1):46-51.  
CHEN Zheng, PAN Erdong, SHEN Jiangwei, et al. Optimization and simulation of PHEV dynamic parameters based on genetic algorithm[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 46-51. (in Chinese)
- [15] 王锋,冒晓建,卓斌.ISG 并联混合动力轿车最优转矩分配策略[J].重庆大学学报,2008,31(5):499-504.  
WANG Feng, MAO Xiaojian, ZHUO Bin. Torque distribution for an integrated starter generator parallel hybrid electric car[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(5): 499-504. (in Chinese)

(编辑 张 莘)