

DOI: 10.7652/xjtuxb201907015

考虑模式切换频率的多模式混合动力汽车参数优化

黄康¹, 王强¹, 邱明明¹, 张怡然¹, 刘泽链¹, 耿丽珍²

(1. 合肥工业大学机械工程学院, 230009, 合肥; 2. 奇瑞汽车股份有限公司, 241000, 安徽芜湖)

摘要: 针对一种新型混联式混合动力系统,采用逻辑门限的方法制定了能量管理策略并用多目标粒子群算法进行了优化。在传统的以新标欧洲循环测试(NEDC)工况下整车经济性、动力性为优化目标的基础上,考虑模式切换频率,增加了模式区分度作为优化目标,选取2个逻辑门限参数和5个传动比参数作为优化变量,使得混合动力系统在保证经济性和动力性的同时,提高了模式选择的稳定性。还根据现有的结构,参考各个动力部件的经济区,制定了基于规则的能量管理策略,并利用 MATLAB 和 Cruise 搭建了仿真模型和控制策略模型。仿真结果表明,采用该方法所得到的2组优化解参数与原参数相比,解1和解2燃油经济性分别提高了12.7%和15%,加速性能提升了15.7%和6.5%且有效避免了模式的频繁切换,工作模式的稳定性得到了保障。最后,利用JC08工况进行了仿真验证,结果表明优化所得的解在JC08工况下仍具有可行性,文中多目标优化方法通用可行。

关键词: 混合动力汽车;逻辑门限能量管理策略;多目标粒子群优化算法;模式区分度

中图分类号: U462.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0099-09

Parameter Optimization of Multi-Mode Hybrid Vehicle Considering Mode-Switching Frequency

HUANG Kang¹, WANG Qiang¹, QIU Mingming¹, ZHANG Yiran¹,
LIU Zelian¹, GENG Lizhen²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Chery Automobile Co. Ltd., Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: A rule-based energy management strategy (EMS) is proposed for a novel series-parallel hybrid vehicle and then optimized via multiple object particle swarm optimization (MOPSO). In addition to the traditional optimization method that considers fuel economy and dynamic performance under new European driving cycle (NEDC) as the objective function, the mode-switching frequency is considered. And the mode discrimination is proposed as the objective function. Five gear ratios and two thresholds in the proposed energy management strategy were optimized via MOPSO which is validated to be effective in maintaining the vehicle dynamic performance and fuel economy and meanwhile improving the mode-selecting robustness. Vehicle model and energy management strategy were established with MATLAB and Cruise. The simulation results showed that compared with the initial parameters, Solution 1 and Solution 2

收稿日期: 2018-12-20。 作者简介: 黄康(1969—),男,教授,博士生导师;邱明明(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0103201)。

网络出版时间: 2019-04-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190403.1028.002.html>

could avoid vehicle working on the boundary of two separate modes and still with the capability to obtain 12.7% and 15% improvements in fuel economy, 15.7% and 6.5% improvements in dynamic performance, respectively. Finally, the simulation results of JC08 driving cycle were used to validate the proposed theory. The results showed that the optimized solutions and the selected multi-objective optimization method are still feasible under JC08 driving cycle.

Keywords: hybrid vehicle; rule-based energy management strategy; multi-objective particle swarm optimization algorithm; mode discrimination

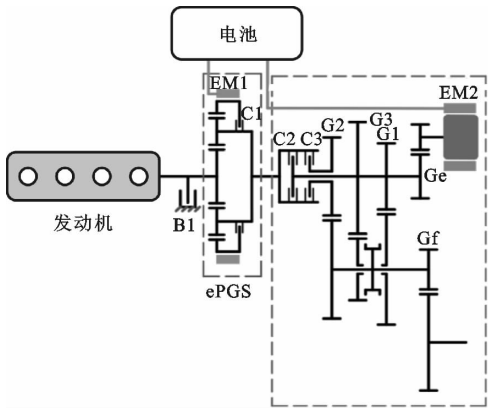
混合动力汽车是未来新能源汽车发展的一个趋势,伴随着在此领域内的深入研究,越来越多的能量管理方法被提出^[1],但是从实用性的角度来看,最基础的逻辑门限能量管理策略却得到了更为广泛的应用。从能量管理策略的角度来说,诸多新颖的能量管理策略以及优化策略实则回归到本质上是对逻辑门限能量管理策略的优化和扩展^[2-6],因此从参数优化的角度来说,往往在以经济性或者动力性为目标时均是以逻辑门限能量管理策略作为基础,进行优化求解。刘永刚等以动力性为约束,通过油电转化系数以经济性为目标,利用模拟退火粒子群算法对逻辑门限能量管理策略中的几个阈值和动力部件的功率进行了优化^[7];张松等采用遗传算法和粒子群算法针对经济性和尾气排放,优化了逻辑门限控制策略中的油门开度、车速等 5 个参数^[8];Zhang 等用 NSGAI 算法,以整合后带权重的油耗以及尾气排放为目标,优化了电机功率等参数并在 ADVISOR 里面进行了仿真验证^[9];Xu 等对一串联式混合动力汽车的电机和主减速器进行了优化,尤其强调对二者进行协同优化,并仿真验证了有效性^[10];Wu 等以燃油经济性为优化目标,通过粒子群算法优化 CD-CS 控制参数,在保证动力性能的同时优化了经济性^[11]。上述研究均只单纯考虑了经济性和动力性因素,而未考虑优化参数使得车辆工作在逻辑门限的边界附近时对车辆工作的稳定性、工作模式切换的频繁性造成的影响。

本文以国家重大专项中的新型高性价比乘用车混合动力汽车为优化对象,以其在新标欧洲循环测试(NEDC)工况下的经济性、加速性能以及模式区分度为优化目标,通过多目标粒子群算法(MOPSO)对其三档传动比、电机 2 的单级减速器传动比以及典型逻辑门限能量管理策略中的两个阈值同时进行优化,在优先考虑动力性和经济性的优化的前提下,提出了模式区分度的概念作为优化目标函数同时对 3 个目标进行优化,保证了新型多模式混合动力汽车模式的稳定性,可避免其在典型工作点下

频繁进行模式切换,进一步提高了车辆运行的稳定性与舒适性。

1 动力总成结构与整车参数

目前国内的汽车企业倾向于在典型的混联式混合动力构型上增加离合、锁止器等以增加动力总成的模式可选择性,以充分利用各个动力部件的高效工作区,提高整体经济性,但这无疑增加了能量管理和参数优化的难度。本文结构来源于国家重大专项 PHEV 项目中给定结构,动力总成结构如图 1 所示。该结构采用单排行星轮,发动机输出连接到了行星轮的太阳轮,并增加了锁止器 B1,电机 1 转子直接输出到行星轮的齿圈上,离合器 C1 用于控制行星耦合机构(ePGS)中发动机与电机 1 的耦合模式,离合器 C2 用于控制 ePGS 模块同电机 2 耦合与否,电机 2 通过单级减速器输出,并增加采用了三档变速箱,利用 C3 和同步器进行换档控制,主要参数如表 1 所示。



B1:锁止器;C1、C2、C3:离合器 1、2、3;G1、G2、G3:变速箱一档、二档、三档;EM1、EM2:电机 1、2;Ge:电机 2 减速器;Gf:主减速器

图 1 动力总成结构

2 逻辑门限值能量管理策略

传统的基于逻辑门限的能量管理策略具有可靠性高、运算量小的特点,得到了广泛的应用。由

表 1 整车及动力源主要参数

部件名称	参数	数值
整车	整备质量 M/kg	2 100
	迎风面积 A_f/m^2	2. 56
	滚动阻力 f_r	0. 01
	车轮半径 r/mm	353
	风阻系数 C_D	0. 36
发动机	功率 P_e/kW	108
	额定转速 $n_e/r \cdot \text{min}^{-1}$	5 500
电机 1	功率 P_{EM1}/kW	55
	最大转矩 $T_{EM1}/\text{N} \cdot \text{m}$	165
电机 2	功率 P_{EM2}/kW	90
	最大转矩 $T_{EM2}/\text{N} \cdot \text{m}$	285

于本文动力总成结构较为复杂,可选的逻辑门划分方式较多,本文根据选用动力总成构型,参考各个动力部件的高效工作区间,采用了如图 2 所示的逻辑门限划分方式,图中 1~6 分别对应于表 2 中模式 1~6。图中横坐标为耦合轴上的转速,纵坐标为耦合后的转矩;左右分界线为发动机的怠速转速,分界线左侧 1 和 2 为纯电模式,右侧从下往上的实线依次为单电机与双电机分界线(1'和 2'分界线)、发动机启动分界线(2'和 3 分界线)、发动机最佳工作曲线(3 和 4 分界线)、发动机与电机 1 耦合分界线(3 和 4 分界线),发动机最佳工作曲线与电机 1 和电机 2 外特性曲线耦合分界线(4 和 5 分界线)、发动机最佳工作曲线与电机 1 和电机 2 外特性曲线耦合线(5 和 6 分界线)、发动机外特性曲线与电机 1 和电机 2 外特性线曲线耦合线。表 2 为逻辑门限能量管理策略中各模式的代号及说明。

表 2 逻辑门限能量管理策略

HEV 模式	代号	工作状态
模式 1	OEM	电机 2 单独工作
模式 2	TEM	电机 1 与电机 2 一起工作
模式 3	LPM	发动机工作在最优工作曲线,电机 2 用富余转矩充电
模式 4	EM1S	发动机工作在最优工作曲线,电机 1 提供不足转矩
模式 5	EM12S	发动机在最优工作曲线,电机 1 和电机 2 共同提供不足转矩
模式 6	FUL	发动机 1 不在最优工作曲线上,电机 1、电机 2 并联
模式 7	DC	行车充电模式(C_{soc} 低于 30% 进入)
模式 8	SC	停车充电模式(C_{soc} 低于 30% 进入)
模式 9	ENA	发动机单独工作模式(备用模式,保证动力性)
模式 10	BRA	能量回收模式(含有机械制动和电机 2 制动以及混合制动 3 种模式)

注: C_{soc} 表示电池荷电状态(SOC)。

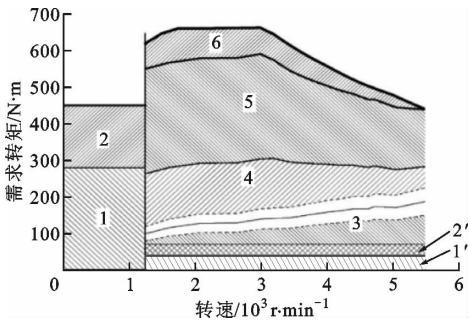


图 2 混合动力模式能量管理策略

3 多目标粒子群优化算法

多目标的粒子群算法以 Coello 等在 2004 年提出的方法^[12]最具有代表性,得到了广泛的认可。与单目标的粒子群优化算法不同的是,多目标之间相互矛盾,没有一个最优解,因此在多目标粒子群优化里面,每个粒子需要单独从保存 Archive 集中选择各自的全局最优点,而对于个体最优点,则通过 Archive 密度信息进行选择。不论是多目标优化还是单目标优化,粒子群算法更新公式为

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k)$$

(1)

式中: r_1 和 r_2 为(0,1)内的随机数,服从平均分布; c_1 和 c_2 为加速系数,通常在(0,2)内取值, c_1 为个体加速系数, c_2 为全局加速系数,分别表示粒子对个体认知和社会知识的信任程度;下标 id 表示第 i 个变量的个体极值的第 d 维;下标 gd 表示全局最优解的第 d 维。

3.1 目标函数

本文选取了传统的经济性和动力性作为优化目标,并提出了区分度的概念,作为第 3 个优化目标。

(1)经济性目标函数。本文不以油电转化系数将油耗转化为电耗,或者电耗转化为油耗进行代换,这种方法实际在不考虑温度对电池的影响的情况下,也只是一个常系数而已,因而本文直观利用当前的电价和油价来设定经济性目标的适应度函数如下

$$f_1 = p_f f_f + p_e f_e \quad (2)$$

式中: p_f 为油价,取6.75元/L; p_e 为电价,取0.5653元/(kW·h); f_f 为一个NEDC循环下的燃油消耗量; f_e 为一个NEDC循环下的电量消耗。所涉及的优化参数有3档传动比。

(2)动力性目标函数。由于采用了3档变速箱,并且要求100 km/h前只换一次档,不适合以百公里加速时间作为优化的适应度函数,在此选取了从0到设计极速(170 km/h)的加速时间作为优化的目标函数。

(3)模式区分度目标函数。文献[13-15]中分别采用了PID、模糊等方法,通过电机补偿,对离合器的转速和电机转速,以及发动机油门开度进行PID控制,来解决在车辆运行中模式切换时存在的问题,文献[13]的结果表明模式切换的平顺性是动力性和舒适性的一对矛盾解,即若要增加舒适性,则会牺牲一部分动力性;若要保证动力性,则模式切换的冲击会更大。也有通过模糊的方法来解决模式与模式之间的边界问题,但这些方法都为对边界点可能出现的位置进行优化,不能解决工作在模式与模式分界点时造成的模式频繁切换问题,因此本文针对这个问题,提出了模式与模式之间区分度的概念,即期望通过对结构参数和逻辑门控制参数的优化,使得模式的典型工作点远离模式与模式的边界,即典型的工作区间不应该出现在模式的边界上。尤其针对本文涉及的这种多模式的混合动力汽车,由于模式较多,模式边界也更为复杂,由此本文提出了第3个目标函数。

本文选取了NEDC工况作该车的典型工作工况,将其在逻辑门策略中的工作位置视作典型的工作点。根据汽车理论,行驶阻力的定义为

$$F_t = Gf + Gi + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + \delta m \frac{du}{dt} \quad (3)$$

式中: G 为汽车的重力; f 为滚动阻力系数; i 为道路坡度; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; u_a 为行驶速度; δ 为汽车旋转质量换算系数。

通过式(4)得到需求转矩为

$$T_{\text{req}} = \frac{F_t r}{i_0 i_g \eta} \quad (4)$$

式中: i_g 为当前档位传动比; i_0 为主减传动比; r 为车轮半径。

通过式(5)得到当前的需求转速为

$$n_{\text{req}} = \frac{u_a i_0 i_g}{0.377 r} \quad (5)$$

根据需求转矩和转速就可以在图6中得到对应的逻辑门的工作点,为了使得工作点离模式的边界尽可能远,设定了如下区分度目标函数

$$f_3 = - \sum_{i=1}^n \omega_j \min(|T_i - T_k|, |T_i - T_{k'}|) \quad (6)$$

式中: T_i 为实际转矩; T_k 和 $T_{k'}$ 分别为所在区域的边界值;负号是因为需要求最大值,做了取负处理; n 为NEDC工况的采样点,本文采样间隔取为1s, n 即为1180; ω_j 为对应模式边界的权重系数。具体来说,希望尽可能避免工作在模式2和模式3的边界附近,因为此处需要启动发动机,又要求最大值,经过多次调整,选取权重系数为0.9,同理模式5与模式6之间的边界也选取权重系数为0.9,因为此处涉及到离合器C1的变换,其余的权重系数取1。注意到,对于低速区的纯电模式向高速区过渡的边界同样涉及到发动机启动,在观察NEDC工作点分布后,工作点实际为从低速区向高速区的单方向跨越,优化此速度分界线对结果的影响不大,故略去对此处的考虑。

3.2 优化参数和约束函数

选取3档传动比分别对应的 i_{g1} 、 i_{g2} 、 i_{g3} ,主减速器传动比 i_{gf} ,电机2的单级减速器的传动比 i_{ge} ,以及模式1与模式2的分界线的设定参数 k_1 ,模式2与模式3的分界线参数 k_2 共7个参数作为优化参数,即有

$$\min \begin{cases} f_1(i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{gf}, i_{ge}, k_1, k_2) \\ f_2(i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{gf}, i_{ge}, k_1, k_2) \\ f_3(i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{gf}, i_{ge}, k_1, k_2) \end{cases} \quad (7)$$

根据最高设计车速的要求,可以得到最小传动比约束条件,即有

$$i_{g3} i_{gf} \leq \frac{0.377 n_{\text{max}} r}{u_{\text{max}}} \quad (8)$$

根据最大爬坡要求,可以得到最大传动比约束条件,即有

$$i_{g1} i_{gf} \geq \frac{r(mg f_r \cos \alpha_{\text{max}} + mg \sin \alpha_{\text{max}})}{n T_{\text{max}}} \quad (9)$$

根据等比数列偏置,得到约束条件

$$1.7 \geq \frac{i_{g2}}{i_{g3}} \geq \frac{i_{g1}}{i_{g2}} \geq 1.3 \quad (10)$$

并由100 km/h前换一次档得到二档约束条件

$$i_{g2}i_{gf} \leq \frac{0.377n_{\max}r}{100} \tag{11}$$

两个模式分界线的约束条件 k_1 、 k_2 的取值范围由在 $5\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的电机转矩进行确定,根据设计由模式 2 进入模式 3 时,希望由两个电机提供转矩启动发动机,以增加模式切换的平顺性,若采用电机 2 单独工作,电机 1 单独启动发动机,从模式 2 向模式 3 切换时,需要闭合离合器 C2,会造成冲击,因此考虑将行星轮的行星架和齿圈作为输入,发动机启动转矩作为负载,利用两个电机启动发动机。根据行星轮的转矩特性,即有

$$T_r:T_r:T_r=1:\alpha:-(1+\alpha) \tag{12}$$

需要电机保留富余的转矩,进而得到 k_1 、 k_2 的约束条件,最终选定优化参数范围如表 3 所示。

表 3 优化参数范围

参数	优化前数值	优化范围
i_{g1}	0.756 1	0.6~1.3
i_{g2}	1.361 0	0.8~1.6
i_{g3}	2.056 7	2~3.8
i_{gf}	4.4	3~5
i_{ge}	1	1~3
$k_1/\text{N}\cdot\text{m}$	80	40~70
$k_2/\text{N}\cdot\text{m}$	100	80~110

3.3 车辆模型以及控制策略模型

AVLCruise 软件作为一款常用的车辆仿真软件,建模方法和模块化的建模手段使得不同项目组可以对模型进行方便快捷的整合,并快速搭建各种复杂的动力传动系统模型,同时进行正向或逆向仿真分析。本文通过 Cruise 建立整车模型,利用 Interface 接口在 Simulink 搭建控制策略进行联合仿真,Cruise 的整车模型如图 3 所示,控制策略模型如图 4 所示。

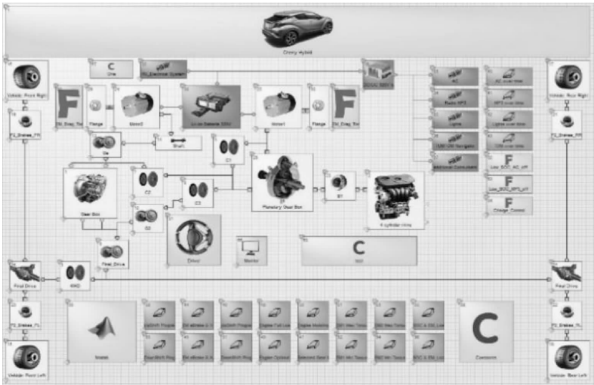


图 3 Cruise 整车模型

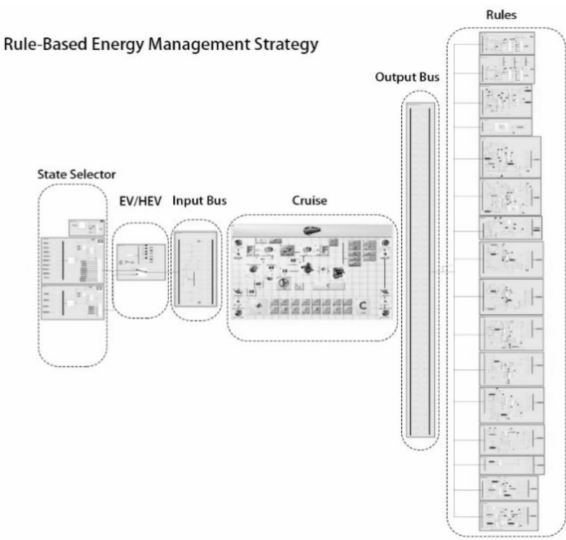


图 4 Simulink 控制模型

4 优化结果与仿真分析

根据本次优化的目标和参数,优化的数学模型如下

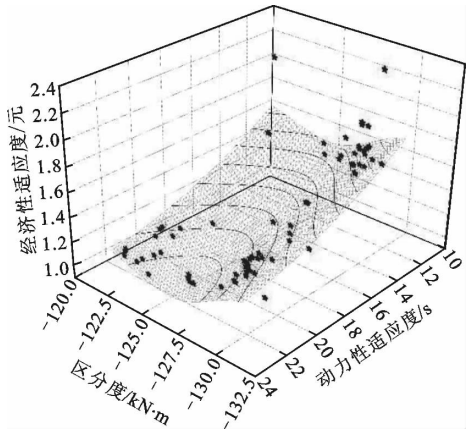
$$\left. \begin{aligned} \min F(x) &= [f_1(x), f_2(x), f_3(x)] \\ x &= (i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{gf}, i_{ge}, k_1, k_2) \\ \text{s. t. } \begin{cases} h_i(x) = 0, & i = 1, 2, 3, \dots, 7 \\ g_j(x) \leq 0, & i = 1, 2, 3, \dots, 7 \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

根据计算精度需求,本文选取了 50 个粒子,选择初始 ω 值为 0.9,并给予一个每次迭代的衰减值为 0.99,这样能保证在 60 次迭代的时候 ω 为 0.45,即能保证初始的搜索速度和后期的搜索精度。个体加速系数 c_1 设置为 1,全局加速系数 c_2 设置为 2,进行 60 次迭代得到的优化结果如图 5 所示。图 5a 中的点均为可行解,近似分布在拟合曲面上。

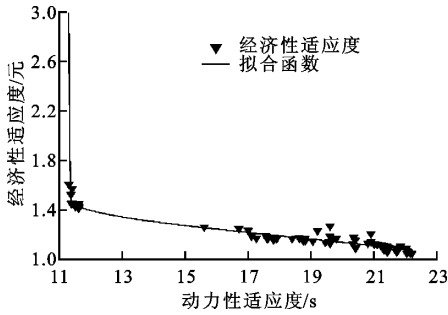
单从动力性和经济性的角度看,这个分布和传统的双目标优化的解的分布方式是一致的,即表现为一对明显的矛盾解,表明优化结果正确继承了双目标优化的结果,但是同时还受到了区分度的有效约束。

由于这些解均为可行解,但本文考虑到动力性不宜太差,区分度良好,要求在 $280\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上,经济性有尽量好的倾向,故选取了 3 组解,并对 3 组可行解在搭建好的 Simulink 和 Cruise 平台上进行了仿真,仿真结果如图 6~8 所示。

由图 6~8 可知,从 0 到 170 km/h ,解 1 的加速时间为 $11.625\,4\text{ s}$,经济性适应度为 1.445 元,解 2 的加速时间为 $11.616\,6\text{ s}$,经济性适应度为 1.607 1 元,解 3 的加速时间为 $21.435\,4\text{ s}$,经济性适应度为

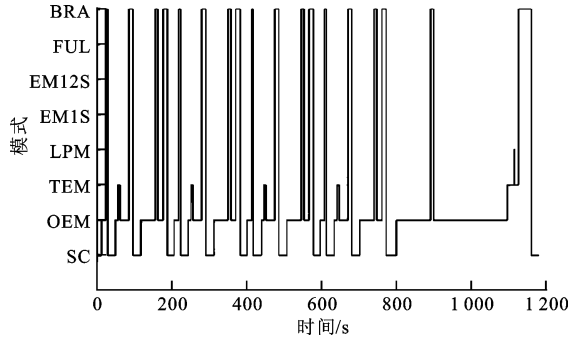


(a)粒子群优化结果三维图

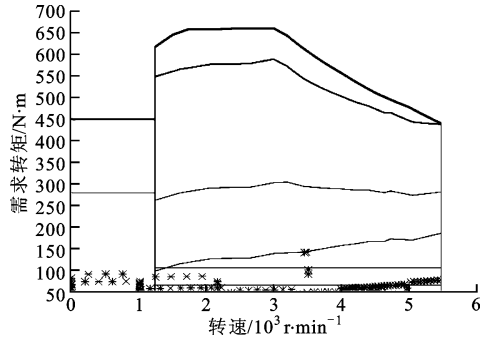


(b)动力性与经济性适应度的关联性

图 5 粒子群优化结果



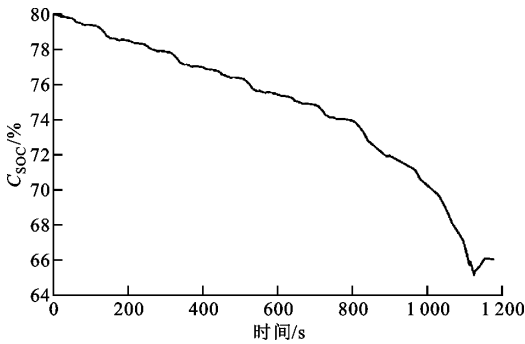
(c)模式变化图



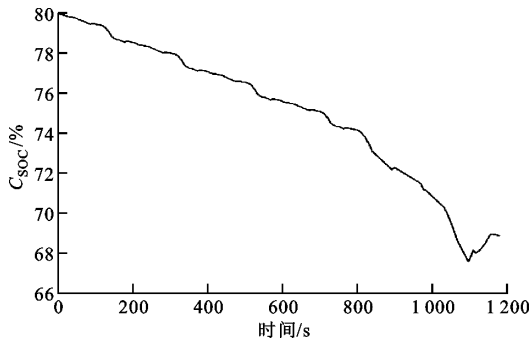
(d)工作点分布图

$i_{g1}=1.281\ 1;i_{g2}=2.177\ 8;i_{g3}=2.966\ 5;i_{gt}=3.044\ 3;$
 $i_{ge}=1;k_1=70\ \text{N}\cdot\text{m};k_2=108.14\ \text{N}\cdot\text{m}$

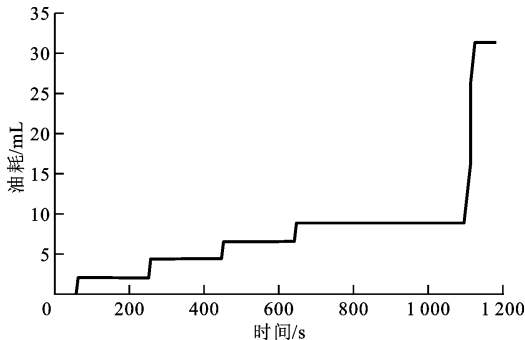
图 6 解 1 仿真结果



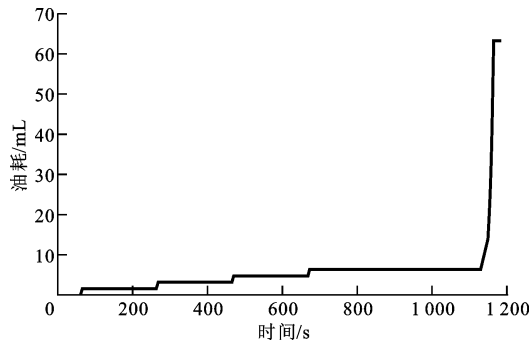
(a)SOC 变化曲线



(a)SOC 变化曲线



(b)油耗曲线



(b)油耗曲线

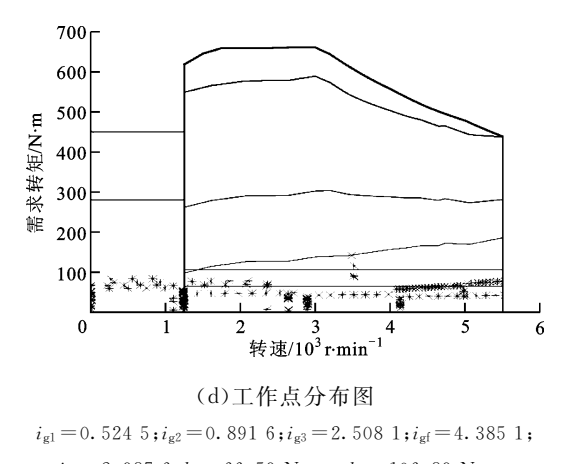
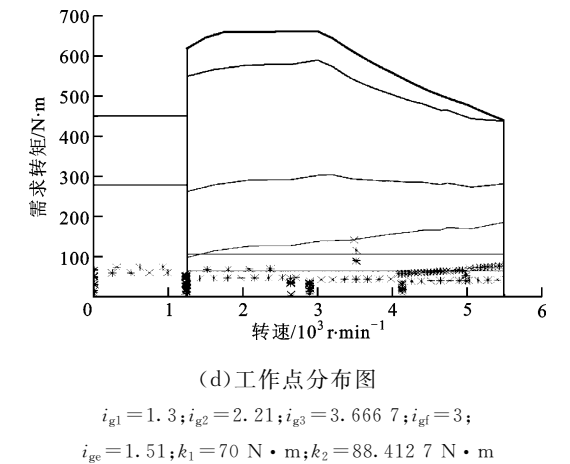
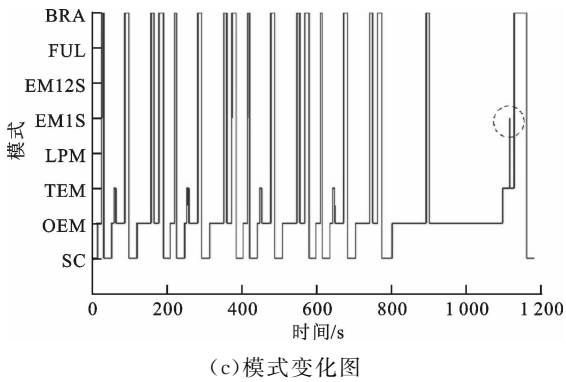
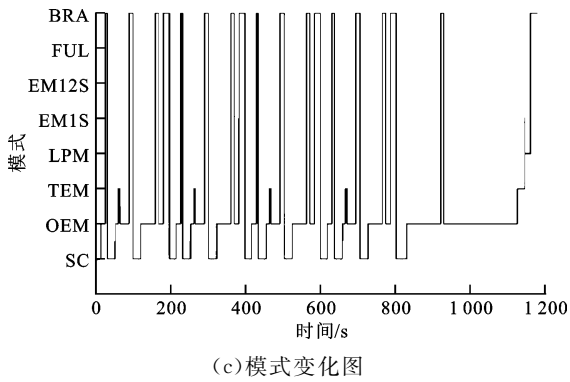
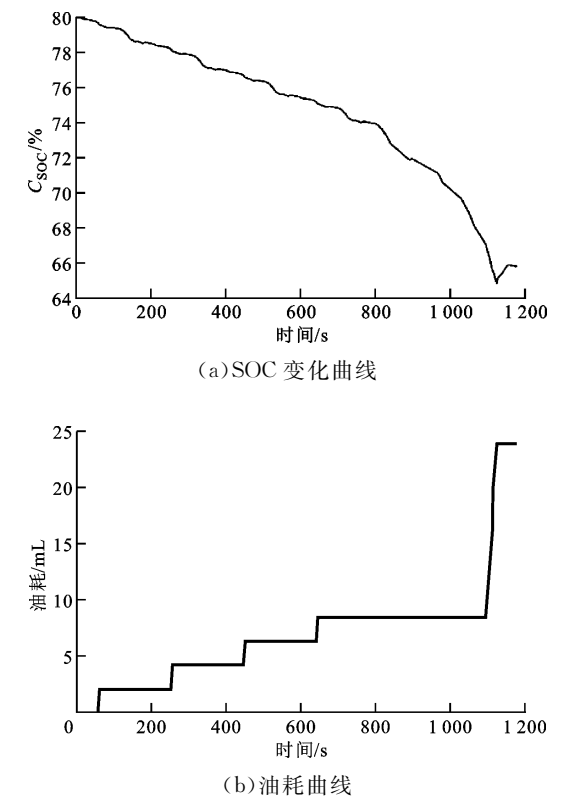


图 7 解 2 仿真结果

图 8 解 3 仿真结果



1.055 9 元。

注意到大多数工作点都在转矩较低的范围，这是因为本车设计之初对百公里加速进行了要求，所选电机功率较大，而在 NEDC 工况内所选电机的性能并不完全发挥。另外注意到，在图 8c 中虚线圈出的区域，模式从 OEM→EM1S→LPM→OEM，在较短的时间(约 5 s)内进行了切换，而在解 1 中也存在这一现象，但是模式并没有调到 EM1S，只是进入了 LPM 以提供短时间加速的动力性需求，这就是本文引入区分度概念的原因，控制传动比参数和 2 个阈值，实际上是控制了工作点在逻辑门控制策略中的位置，以防止频繁地工作在边界上造成频繁的模式切换。同时，本文也继承了传统优化思路，保证了燃油经济性和整车的动力性能，其中解 3 仅因为说明区分度作用而给出，故不作对比，其余两解与原结果对比的结果如表 4 所示。

为了验证这套优化理论的通用性，本文利用 JC08 工况进行了仿真验证，仿真结果如图 9~图 12 所示。

表 4 优化结果对比

参数	原始数据	解 1	解 2
加速时间/s	13.316 6	11.625 4	11.316 6
经济性适应度/元	1.713 9	1.445 0	1.601 7
加速时间降低百分比/%		12.7	15.0
经济性适应度降低百分比/%		15.7	6.5

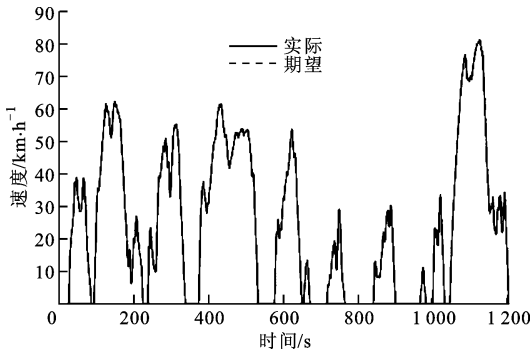


图 9 JC08 工况解 1 速度跟踪

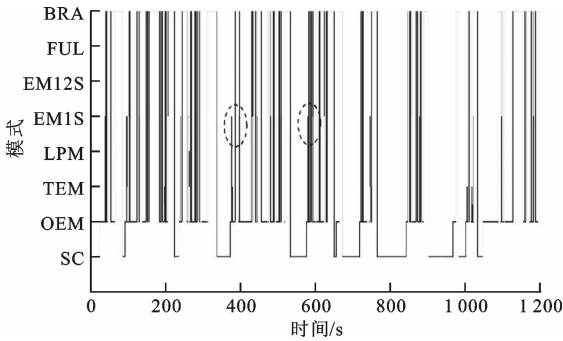


图 10 JC08 工况解 1 模式选择

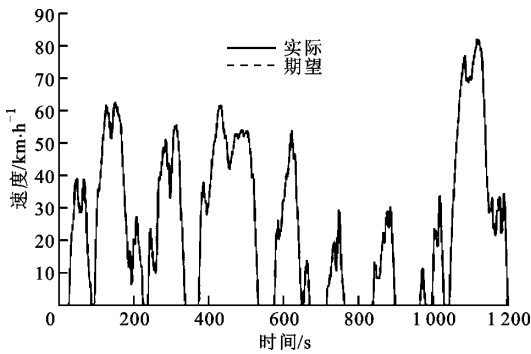


图 11 JC08 工况解 2 速度跟踪

从图 9~图 12 中可以看出,JC08 工况的启停、加减速更为频繁,循环的规律性更差,对车辆要求更高,但是在该优化参数和控制策略下仍能保证较好的速度跟踪。从模式选择图可以看出,车辆的加减速频繁,有部分文献中指出,出于对电池寿命的考虑,不应使得电池在频繁充电和放电之间转换。因此,本文对所采用的制动模式进行了限制,在频繁的

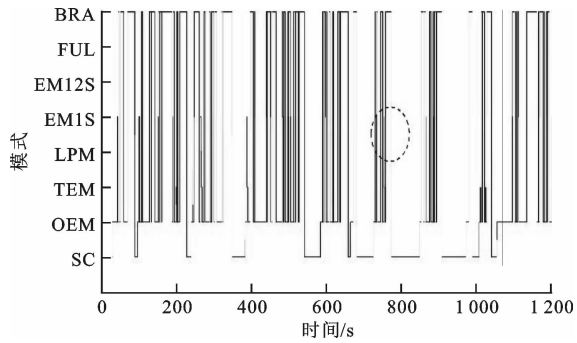


图 12 JC08 工况解 2 模式选择

低减速度下采用机械制动,为了方便表达,制动模式都放在了 BRA 内,故在 JC08 工况复杂的加减速环境下,虽然可以观察到频繁进入 BRA,但是电机 2 并不会频繁进行充放电。从图 9~图 12 还可看出,控制策略均能良好跟踪,模式基本保持稳定,虚线圆圈处表示为模式快速切换的位置,主要存在于 JC08 工况的冷启动阶段及高速阶段,造成了速度跟踪出现误差,另外速度跟踪误差还出现在瞬态阶段,其余模式选择均正确而且稳定,证明优化结果在 JC08 工况下仍能较好适用。这表明额外选取区分度作为优化的适应度函数的方法具有通用性,其结果也具有一定的通用性。

5 结 论

本文根据现有的结构,参考各个动力部件的经济区,制定了基于规则的能量管理策略,并利用 Cruise 和 Simulink 搭建了整车模型以及控制策略模型。在以经济性和动力性为目标的基础上,进一步提出了模式区分度的概念,定义并转换为了第 3 个优化目标,以现有结构中的 5 个传动比以及 2 个逻辑门阈值为优化参数,利用多目标粒子群算法进行优化,得到了 Pareto 非劣解集。选取并通过 Cruise 和 Simulink 平台验证了所选的 3 组解,其中 2 组解结果表明该方法能很好地降低燃油经济性,保证动力性,同时规避了典型工作区间下频繁模式切换的问题,车辆的稳定性和舒适性得到了提高。通过 JC08 这个较 NEDC 更为复杂的工况对所选两组解进行了仿真验证,结果表明,在该工况下车辆的运行稳定,并能实现速度的跟踪,说明该优化方法具有良好的通用性。

参考文献:

[1] MARTINEZ C M, HU X, CAO D, et al. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles; recent

- progress and a connected vehicles perspective [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 4534-4549.
- [2] DERAKHSHAN M, SHIRAZI K H. Optimized fuzzy controller for a power-torque distribution in a hybrid vehicle with a parallel configuration [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D Journal of Automobile Engineering, 2014, 228(14): 1654-1674.
- [3] MANSOUR C J. Trip-based optimization methodology for a rule-based energy management strategy using a global optimization routine: the case of the Prius plug-in hybrid electric vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(11): 1529-1545.
- [4] HAJIMIRI M H, SALMASI F R. A fuzzy energy management strategy for series hybrid electric vehicle with predictive control and durability extension of the battery [C]//IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-5.
- [5] ZHENG C, XU G, XU K, et al. An energy management approach of hybrid vehicles using traffic preview information for energy saving [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 105: 462-470.
- [6] LI G H, HU J J. Modeling and analysis of shift schedule for automatic transmission vehicle based on fuzzy neural network [C]//2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 4839-4844.
- [7] 刘永刚, 李杰, 秦大同, 等. 基于多工况优化算法的混合动力汽车参数优化 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 61-69.
LIU Yonggang, LI Jie, QIN Datong, et al. Parameter optimization of hybrid electric vehicle based on multi-cycle optimization algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 61-69.
- [8] 张松, 吴光强, 郑松林. 插电式混合动力汽车能量管理策略多目标优化 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 99-103.
ZHANG Song, WU Guangqiang, ZHENG Songlin. Multi-objective optimization of energy management strategy of plug-in hybrid electric vehicle [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(7): 99-103.
- [9] ZHANG B, CHEN Z, MI C, et al. Multi-objective parameter optimization of a series hybrid electric vehicle using evolutionary algorithms [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 921-925.
- [10] XU K, QIU B. Optimized parameter matching method of plug-in series hybrid electric bus [C]//International Conference on Connected Vehicles and Expo. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2012: 322-328.
- [11] WU X, CAO B, WEN J, et al. Particle swarm optimization for plug-in hybrid electric vehicle control strategy parameter [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [12] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
- [13] SIM K, OH S M, NAMKOONG C, et al. Control strategy for clutch engagement during mode change of plug-in hybrid electric vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(5): 901-909.
- [14] 杜波, 秦大同, 段志辉, 等. 新型并联式混合动力汽车模式切换协调控制 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 739-744.
DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, et al. Coordinated control for mode-switch of a new parallel HEV [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 739-744.
- [15] WAHSH S, HAMED H G, NASHED M N F, et al. Fuzzy logic based control strategy for parallel hybrid electric vehicle [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 30-34.

(编辑 荆树蓉)