

DOI: 10.11992/tis.201603024

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20170217.1012.010.html>

# 萤火虫算法的电动汽车综合成本运行优化研究

许斌杰, 王耀南

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为实现节能减排,文章以增程式电动汽车为研究对象,提出了一种基于动态综合成本的增程器运行优化方法。首先以增程器发动机外特性为研究基础,根据实际工作状态分别建立了发动机燃油消耗率及 CO 排放率模型,再通过归一化后将多个目标加权求和的方法建立电动汽车综合成本运行优化模型。模型建立后,在全局优化及特定功率优化这两种常见模式下以萤火虫算法进行寻优,最后在不同的权重条件下得出最佳综合成本运行曲线。实验结果表明,文章提出的方法能够在不同的运行环境下通过动态调整权重值,实现基于燃油消耗率及 CO 排放的综合成本运行优化。

**关键词:**电动汽车;油耗;排放;成本;发动机;增程器

**中图分类号:** TP27;U469.7 **文献标志码:**A **文章编号:** 1673-4785(2017)02-0166-06

中文引用格式:许斌杰,王耀南. 萤火虫算法的电动汽车综合成本运行优化研究[J]. 智能系统学报, 2017, 12(2): 166-171.

英文引用格式:XU Binjie, WANG Yaonan. Optimizing the composite cost of electric vehicles based on the firefly optimization model [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(2): 166-171.

## Optimizing the composite cost of electric vehicles based on the firefly optimization model

XU Binjie, WANG Yaonan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** To achieve savings in energy and reductions of emissions, we propose a process operation optimization method based on dynamic comprehensive cost for range-extending electric vehicles. With the external characteristics of range-extending engines as the basis of our research, we first established engine fuel consumption and carbon monoxide (CO) emission rate models according to actual working conditions. Next, through normalization, we developed an operation optimization model of comprehensive cost for the electric vehicle by using a multi-goal weighted summation method. With our optimization model, we used the firefly algorithm to find the optimal operation value using the two patterns of global optimization and specific power optimization. Finally, we obtained the operation curve corresponding to the optimal comprehensive cost under different weight conditions. Our experimental results show that our proposed method can dynamically adjust the weight value in different operating environments, thus optimizing comprehensive cost based on both fuel consumption and CO emissions.

**Keywords:** electric vehicle; fuel consumption; emission; cost; engine; range extender

随着中国工业化进程的迅速加快和汽车保有量的急剧增长,能源危机迫在眉睫,同时,汽车发动机

燃烧后排出的废气也严重污染了大气环境<sup>[1]</sup>。为应对这一系列问题,并把握我国交通能源动力系统的宝贵转型机遇,新能源汽车应运而生。但是,受制于电池技术发展的瓶颈,纯电动汽车无论在技术上还是市场上均难以普及。增程式电动汽车(REEV)因既具有纯电动汽车污染小、能耗低的优点,同时又

收稿日期:2016-03-15. 网络出版日期:2017-02-17.

基金项目:国家“863”计划项目(2012AA1111004);国家自然科学基金项目(61104088).

通信作者:许斌杰. E-mail: xubinjie@hnu.edu.cn.

能实现较长续航里程,已经成为传统内燃机汽车与纯电动汽车之间的理想过渡车型。能耗与污染气体排放是衡量新能源汽车的重要指标,CO是汽车主要的排放污染物之一,确定功率需求之后,以油耗和污染气体排放最小为目标,确定增程器工作点,是增程式电动汽车能量管理与运行优化的重要研究方向之一<sup>[2]</sup>。文献[3-5]分别通过不同的控制策略来实现电动汽车的节能优化;文献[6]以碳排放为优化对象进行了电动汽车充电站的规划;文献[7]也针对货车的污染物排放进行了研究;尽管上述方法都通过不同途径实现了汽车的运行优化,但是都没有在发动机实际限制条件下同时考虑油耗及污染气体排放。为解决工业应用中经常遇到的各种优化问题,学者们提出了多种优化算法,文献[8]提出一种改进的教与学优化算法提高BP神经网络的输出精度;文献[9]基于鱼群算法完成了仿人机器人的步态优化。本文所选用的萤火虫算法(FA)是由剑桥学者Yang<sup>[10]</sup>在2008年提出的一种随机优化算法,已经应用与多种工程实践之中,运用萤火虫优化算法,在考虑发动机的油耗的同时兼顾CO排放优化问题,实现了增程式电动汽车运行优化研究。

## 1 萤火虫优化算法

### 1.1 萤火虫优化算法

以模拟自然界生物觅食或信息交换过程为特色的群智能优化算法是近年来备受关注的研究领域之一。萤火虫算法模拟自然界中萤火虫之间因觅食及择偶等活动中产生的依靠光照亮度而相互吸引的合作行为。每个萤火虫均是一个存在于种群中的独立个体,它们都具有一定的感知能力,不同的萤火虫发出的光强弱不一,搜索范围内发光弱的萤火虫被发光的萤火虫所吸引,并在萤火虫之间的移动过程中实现位置迭代,寻找最优解的过程就是寻找最亮的萤火虫的过程,搜索过程就是不断的迭代过程,在不断的迭代中实现寻优<sup>[11]</sup>。

### 1.2 主要参数介绍

FA算法中,萤火虫的寻优主要与几个重要参数相关,即萤火虫的荧光亮度和萤火虫的相互吸引度及种群规模。萤火虫的荧光亮度代表着萤火虫所处空间位置的“好坏”,荧光最亮的萤火虫位置就是所要寻找的最优点的位置,同时,荧光越亮的萤火虫对周围萤火虫的吸引度越高,且这两个重要参数均与距离成反比关系,即距离越大,两者吸引度越小。

1) 荧光亮度  $S(r)$ :如式(1)所示, $S_0$ 代表最亮的萤火虫荧光亮度,与寻优的目标函数值相关,目标函

数值越优自身亮度越高; $\beta$ 表示光吸收系数,因为光在传播过程中荧光会随着距离增加而减弱,光吸收系数体现荧光减弱的速度,实际优化中, $\beta \in [0.01, 1]$ , $r$ 表示萤火虫之间的距离。

$$S(r) = S_0 e^{-\beta r^2} \quad (1)$$

2) 相互吸引度  $\gamma$ :如式(2)所示, $\gamma_0$ 指最亮萤火虫的吸引度,即光源吸引度( $r=0$ )。

$$\gamma(r) = \gamma_0 e^{-\beta r^2} \quad (2)$$

3) 种群规模  $M$  及最大迭代次数  $g$ :种群规模大小及迭代次数影响寻优的准确度及速度,一般选择20~60,特定问题可以取到100~200,而继续增大  $M$  对增强算法准确度并无明显效果,反而将显著增加计算量,反而不利于寻优。

确定几个重要参数之后,各萤火虫即可通过迭代不断寻优,其位置更新公式如式(3):

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \gamma_0 e^{-\beta r_{ij}^2} + \zeta \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: $\zeta$ 是 $[0,1]$ 上的随机常数, $\varepsilon_i$ 为 $[0,1]$ 上服从正态分布的随机因子。

### 1.3 主要流程

算法1 FA( $t, \beta, \gamma_0, g, M$ )

初始化:  $t=0, x_i(t) = \text{rand}, \beta=0.4, \gamma_0=1.0, g=60$ ;

计算各萤火虫适应度值:  $F_i(t) = F(x_i(t))$ ;

While( $t < g$ )

for( $i=1:M$ )

for( $j=1:i$ )

计算萤火虫  $X_i$  荧光强度  $S_i(r)$

if( $S_i(r) < S_j(r)$ )

萤火虫  $i$  向萤火虫  $j$  移动

end if

计算更新的荧光强度

end

end

萤火虫进行排序,找出当前最优解

end

FA算法中各萤火虫按照上述步骤迭代寻找到最优值。

## 2 电动汽车运行优化问题

文章所研究的增程式电动汽车动力系统结构如图1所示,电驱动系统、增程器系统以及整车控制系统共同构成了车辆动力系统。电驱动系统与整车控制系统相互配合即可实现电动汽车的纯电行驶,但由于动力电池容量较小,纯电动行驶续航里程较短。即当动力电池电量(Soc)消耗至最低临界限值

$Soc_{min}$  时,需要启动增程器(APU)为整车提供能量从而延长汽车续驶里程。APU 由发动机、发电机和 PWM 整流器组成。如式(4):

$$P = P_{BAT} + P_{APU} \quad (4)$$

车辆运行过程中,整车控制器根据动力电池提供的功率  $P_{BAT}$  及整车实时功率需求  $P$  向 APU 发出功率需求  $P_{APU}$ 。由于增程式电动汽车车辆驱动轮仅与驱动电机机械相连,而与 APU 相互隔离,因此发动机转速和转矩可以运行在满足功率要求的任意工作点上,而发动机的油耗和 CO 排放由其工作点决定,因此,控制发动机的工作点可以实现对其油耗及 CO 排放的优化。

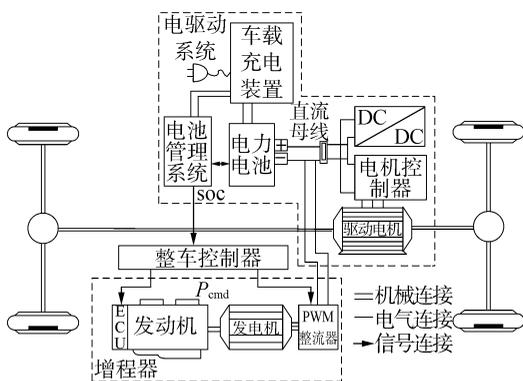


图 1 增程式电动汽车动力系统结构示意图

Fig.1 Schematic of the power-train of REEV

为衡量增程式电动汽车燃油经济性能,常常用到有效燃油消耗率(BSFC),它是指单位有效功的耗油量,通常用每千瓦小时有效功所消耗的燃油克数来表示,有效燃油消耗率越低,经济性越好。类似地,以每千瓦小时有效功所排放的气体克数来衡量增程式电动汽车排放性能。由于 APU 的有效燃油消耗率及有效 CO 排放率直接取决于起工作点  $(N, T)$ , 根据发动机最佳 BSFC 和排放性能及实时功率需求来确定工作点可以有效减少能源消耗及 CO 排放。

### 2.1 电动汽车增程器油耗及排放模型

在 MATLAB 环境下,以某峰值功率为 40 kW,排气量为 1.0 L 的自然吸气汽油发动机为研究对象,根据 GB/T18297-2001 规定的发动机试验方法<sup>[12]</sup>,分别在  $27 \times 8$  个转速、转矩点上测量发动机的油耗率及 CO 排放,然后采用双三次插值法,分别得到如图 2、图 3 所示的发动机的转速-转矩-油耗率特性 Map 图及转速-转矩-CO 排放率特性 Map 图,其中的黑色粗实线表征的外特性曲线是指发动机工作在全负荷状态下时的速度转矩特性,它表示 APU 所能达到的最大动力性能,即 APU 实际可运行区域。

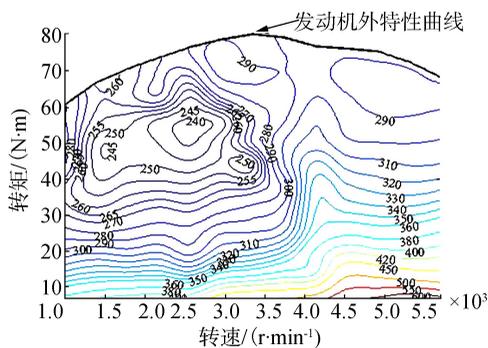


图 2 发动机转速-转矩-油耗率特性

Fig.2 Speed-torque-fuel consumption rate characters of the engine

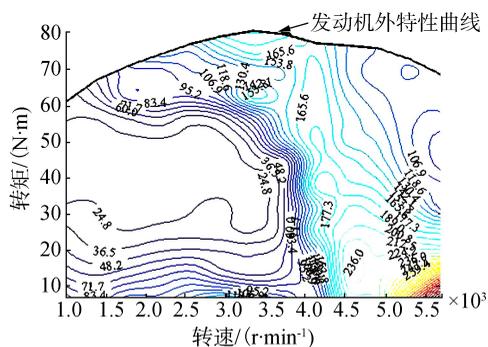


图 3 发动机转速-转矩-CO 排放率特性

Fig.3 Speed-torque-CO consumption rate characters of the engine

不同的工作点  $(N, T)$  对应不同的油耗率及 CO 排放,等高线分别为等油耗率线及等 CO 排放线。

由图 2、图 3 可知,油耗与 CO 的优化方向并不完全重合,有时甚至会相互冲突。

$$T = 9549 P/N \quad (5)$$

式中: $P$ 、 $T$ 、 $N$  分别为发动机功率、转矩、转速,整车控制器根据动力电池提供的功率及整车实时功率需求向 APU 发出功率需求  $P_{APU}$ ,根据  $P_{APU}$  可以在转速-转矩-油耗率及转速-转矩-CO 特性 Map 图上分别得到工作点可运行范围,在可运行范围上找到油耗率最低及 CO 排放最少的点即为分别的最优点。

如式(6)所示,APU 油耗优化问题及 CO 排放优化问题可以等效为以油耗率及 CO 排放率为目标函数,以 APU 转速  $N$  和转矩  $T$  为优化变量的最小化优化问题,即

$$\begin{aligned} \min[W(N, T)] &= \min(W_{FC}(N, T)) \\ \min[W(N, T)] &= \min(W_{CO}(N, T)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $W(N, T)$  为 APU 对应的工作点,  $W_{FC}$  及  $W_{CO}$  分别为 APU 工作点对应的油耗率及 CO 排放率。

### 2.2 电动汽车增程器综合成本模型

实际的增程器系统需要同时考虑燃油效率及 CO 排放多个目标,并且多个目标之间存在一定的

冲突,难以寻找到一个能使多个目标均实现最优化的解。文章采用多目标加权求和的方法,构建增程器综合成本,赋予燃油效率及 CO 排放不同的权重值,将多目标优化问题转化为一个单目标优化问题,降低了计算量,同时能根据不同的实际需要分配不同权重值而实现对特定要求的工作点优化。由式(7),先将目标函数转化为[0,1]内的无量纲纲,

$$\begin{cases} F_{FC}(N, T) = \frac{W_{FC}(N, T) - \min[W_{FC}(N, T)]}{\max[W_{FC}(N, T)] - \min[W_{FC}(N, T)]} \\ F_{CO}(N, T) = \frac{W_{CO}(N, T) - \min[W_{CO}(N, T)]}{\max[W_{CO}(N, T)] - \min[W_{CO}(N, T)]} \end{cases} \quad (7)$$

归一化后,根据式(8)对增程器特性进行加权平均操作:

$$\begin{cases} F_S = \frac{w_1 F_{FC} + w_2 F_{CO}}{w_1 + w_2} \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $w_1$ 及 $w_2$ 两项即为油耗率和 CO 排放的权重值,表示系统对两项分别的“重视程度”,通过调整 $w_1$ 及 $w_2$ 的值对油耗和 CO 排放进行优化。图 4 为初始化设置 $w_1 = w_2 = 0.5$ 时,即同等程度重视油耗率及 CO 排放时的发动机转速-转矩-综合成本特性 Map 图。

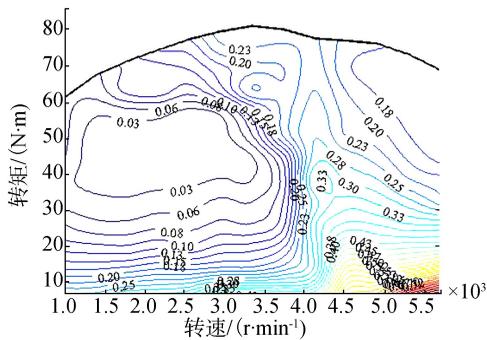


图 4 发动机转速-转矩-综合成本特性

Fig.4 Speed-torque-composite cost characters of the engine

根据式(8)可以动态调整 $w_1$ 与 $w_2$ 的值来实现电动汽车综合成本运行优化,其运行优化的标准为:

- 1) 根据不同国家或者地区对汽车油耗率或者排放的不同规定,动态调整 $w_1$ 与 $w_2$ 的值,直至达标;
- 2) 根据车辆运行环境,动态调整 $w_1$ 与 $w_2$ 的值以避免环境的进一步恶化,例如当车辆行驶在空气质量较好的农村地带或者城市郊区时,可以通过增大 $w_1$ 来重点实现汽车油耗率的优化,而在空气污染严重的城市中心或者工业区时,增大 $w_2$ 以重点改善车辆排放性能。

其中 $w_i(i=1,2)$ 按图 5 所示流程及式(9)进行动态调整:

$$\begin{cases} w_i(t+1) = 0.5w_i(t) + 0.45 \\ w_1 + w_2 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

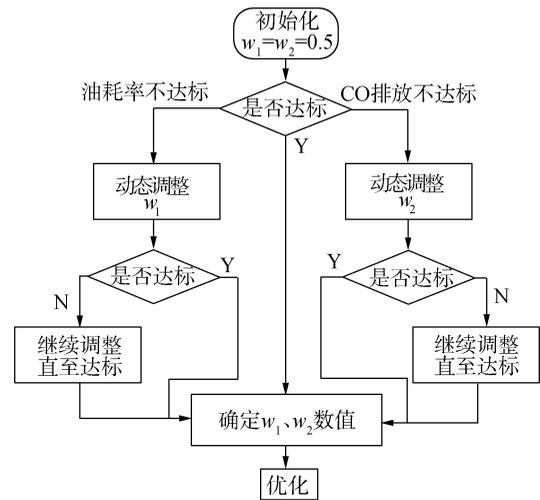


图 5 权重调整流程图

Fig.5 Diagram of weight adjustment process

至此,以发动机转速 $N$ 和转矩 $T$ 为优化变量,以 APU 油耗率和 CO 排放率构成的综合成本为优化目标,并通过发动机外特性作为约束条件的电动汽车增程器综合成本优化模型成功建立。

### 3 优化结果及对比分析

根据以上分析,在已经建立的电动汽车增程器综合成本模型下,按照 1.3 节说明的算法执行流程,对发动机工作点进行 FA 优化。

#### 3.1 全局优化

全局优化模式下,首先初始化设置 $w_1 = w_2 = 0.5$ 时,萤火虫在满足外特性条件的全部范围内寻优,优化结果如图 6 所示。此时, $N = 2540.8 \text{ r/m}$ , $T = 49.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,综合成本取得最小值 $F_S = 0.01$ 。

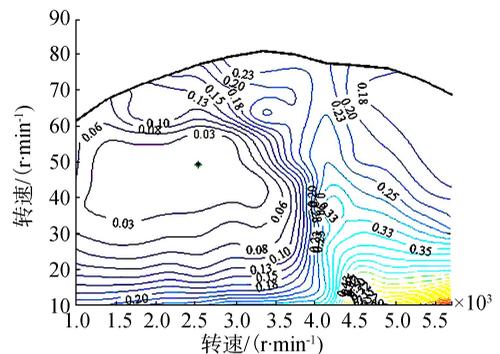


图 6 全局优化时最优解分布情况

Fig.6 Distribution of the firefly optimal solution in solution space

### 3.2 最佳综合成本运行曲线

当整车控制器对 APU 发出特定的功率点需求  $P_{APU}$  时,发动机将工作在整车控制器指定的功率点上,此时的可运行工作点为功率为  $P_{APU}$  的等功率线上,如图 7 所示黑色实线即为  $P_{APU} = 25 \text{ kW}$  时 APU 工作区间,优化变量需要满足式(10)。

$$\begin{cases} \max(N_{\min}, \Xi_x(f_{\text{tm}}(N), g(N, P))) \leq \\ N \leq \min(N_{\max}, \Xi_x(T_{\min}, g(N, P))) \\ T = 9549 P/N \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\Xi_x(f_{\text{tm}}(N), g(N, P))$  表示 APU 外特性曲线  $f_{\text{tm}}(N)$  与等功率线  $g(N, P_{\min})$  的交点处转速,  $\Xi_x(T_{\min}, g(N, P))$  为 APU 最小功率与功率等高线  $g(n, P)$  交点处的转速,图 8 即为  $P_{APU} = 25 \text{ kW}$ , 且  $w_1 = w_2 = 0.5$  时综合成本优化结果。此时,  $N = 3453.1 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $T = 69.1 \text{ Nm}$  时,综合成本取得最小值  $F_s = 0.19$ 。

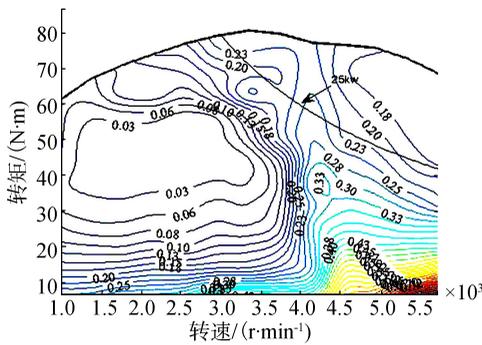


图 7  $P_{\text{cmd}} = 25 \text{ kW}$  时 APU 工作区间

Fig.7 Feasible operating area when  $P_{\text{cmd}} = 25 \text{ kW}$

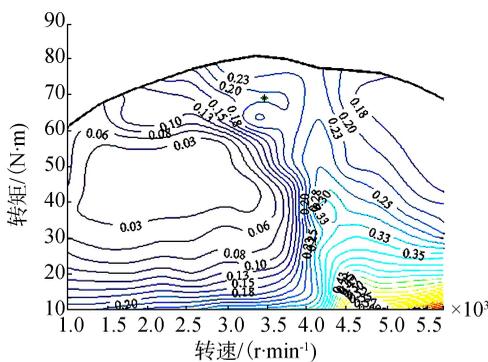
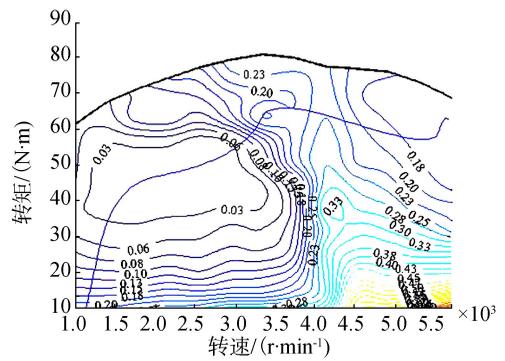


图 8  $P_{\text{cmd}} = 25 \text{ kW}$  时最优解分布情况

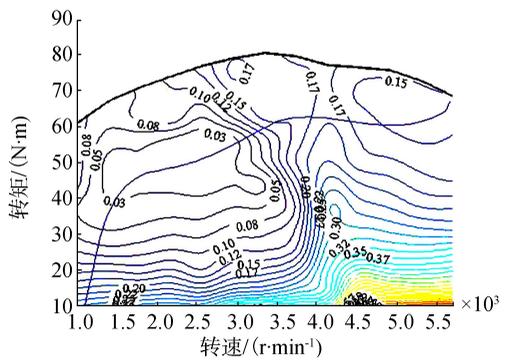
Fig.8 Distribution of the firely optimal solution when  $P_{\text{cmd}} = 25 \text{ kW}$

设定功率值从  $1 \text{ kW} \sim 40 \text{ kW}$ , 以每隔  $3 \text{ kW}$  为间隔, 在  $w_1 = w_2 = 0.5$  时利用 FA 算法模型进行 APU 综合成本优化, 即可得到 APU 最佳综合成本运行曲线, 如图 9(a) 所示, 当车辆需要更多考虑减小油耗率时, 动态调整至  $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$ ,

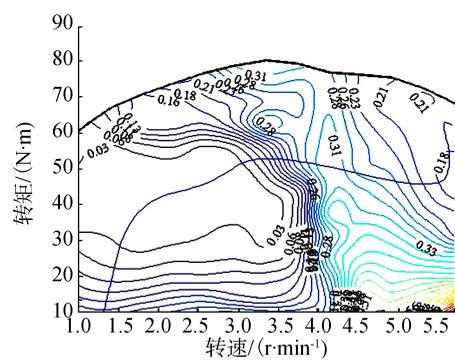
而当车辆需要更多考虑减少 CO 排放时, 动态调整  $w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$  对工作点进行寻优, 改善车辆的排放性能, 而得到的 APU 最佳综合成本运行曲线的结果分别如图 9(b)、(c) 所示。比较 3 张图, 基于不同的权重考虑下, APU 最佳综合成本运行曲线会发生明显变化, 以寻求不同目的下的油耗率及 CO 排放率的共同优化。



(a)  $w_1 = w_2 = 0.5$



(b)  $w_1 = 0.8, w_2 = 0.2$



(c)  $w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$

图 9 基于 PSO 算法的最佳综合成本曲线

Fig.9 The best composite cost curve based on PSO model

## 4 结束语

为应对日益严峻的能源危机与环境污染问题, 文章讨论的增程式电动汽车增程器发动机在其外特性基本限制条件下, 综合考虑了燃油消耗及 CO 排放特性, 并在 MATLAB 环境下建立了基于两者的综

合成本模型,实现了基于萤火虫算法的全局优化及特定功率点的优化,最后在3种不同权重条件下完成了最佳综合成本运行曲线的绘制,通过3种曲线的对比表明,基于基于萤火虫算法的电动汽车综合成本研究能实现不同情况下的运行优化。

## 参考文献:

- [1] 支树模. 汽车排放污染物控制与零排放净化技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-5.
- [2] EHSANI M, GAO Yimim, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles fundamentals, theory and design second edition[M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [3] 闵海涛, 叶冬金, 于远彬. 增程式电动汽车控制策略的优化[J]. 汽车工程, 2014, 36(8): 899-903, 943. MIN Haitao, YE Dongjin, YU Yuanbin. Optimization of the control strategy for range extended electric vehicle[J]. Automotive engineering, 2014, 36(8): 899-903, 943.
- [4] SUN Dongye, LIN Xinyou, QIN Datong, et al. Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2012, 25(6): 1161-1170.
- [5] CERAOLO M, DI DONATO A, FRANCESCHI G. A general approach to energy optimization of hybrid electric vehicles [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2008, 57(3): 1433-1441.
- [6] 陈光, 毛召磊, 李济沅, 等. 计及碳排放的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 49-53, 136. CHEN Guang, MAO Zhaolei, LI Jiyuan, et al. Multi-objective optimal planning of electric vehicle charging stations considering carbon emission[J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(17): 49-53, 136.
- [7] 王军方, 付明亮, 丁焰, 等. 低速货车的污染物排放特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 57-63. WANG Junfang, FU Mingliang, DING Yan, et al. Emissions characteristics of low speed vehicles[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(14): 57-63.
- [8] 拓守恒. 一种优化神经网络的教与学优化算法[J]. 智能系统学报, 2013, 8(4): 327-332. TUO Shouheng. A modified teaching-learning-based optimization algorithm and application in neural networks [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2013, 8(4): 327-332.
- [9] 卢嘉敏, 杨宜民, 付根平. 基于鱼群算法的仿人机器人步态优化[J]. 智能系统学报, 2013, 8(6): 526-531. LU Jiamin, YANG Yimin, FU Genping. Research on the gait optimization of humanoid robots based on the fish swarm algorithm [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2013, 8(6): 526-531.
- [10] 曾冰, 李明富, 张翼, 等. 基于萤火虫算法的装配序列规划研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 177-184. ZENG Bing, LI Mingfu, ZHANG Yi, et al. Research on assembly sequence planning based on firefly algorithm[J]. Journal of mechanical engineering, 2013, 49(11): 177-184.
- [11] 李瑞青. 改进的萤火虫算法及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 1-5. LI Ruiqing. Improved firefly algorithm and application[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 1-5.
- [12] 汽车发动机标准化技术委员会. GB/T 18297-2001, 汽车发动机性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. Automotive Engine Standardization Technical Committee. GB/T 18297-2001, Performance test code for road vehicle engines[S]. Beijing: China Standards Press, 2004.

## 作者简介:



许斌杰,男,1989年生,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车控制技术。



王耀南,男,1957,教授,博士生导师,主要研究方向为电动汽车控制、智能控制理论与应用、智能机器人。技术成果曾获国家科技进步二等奖、中国发明创业特等奖、省部级科技进步一等奖、省部级科技进步二等奖。发表学术论文360余篇,其中SCI收录38篇,SCI引用175篇次,EI收录109篇,获国家专利12项。出版学术专著《智能控制系统》、《机器人智能控制工程》、《智能信息处理技术》、《计算机图像处理与识别技术》、《计算智能方法与应用》等。