

插电式混合动力汽车消费者拥有成本模型

王宁^{1,2}, 龚在研^{1,2}, 赵洁¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 200092; 2. 同济大学新能源汽车产业化研究中心, 上海 200092)

摘要: 采用并联式混合动力系统作为驱动系统布置方案, 利用 Advisor 界定插电式混合动力汽车的结构和动力部件, 建立分别拥有 20 和 60 km 不同续驶里程的插电式混合动力模型, 基于购置成本和使用成本构建两种情况的消费者拥有成本模型并与相同等级内燃机汽车和传统混合动力汽车比较, 分析 15 年名义寿命周期内基本、政府补贴和油价上涨三种情景插电式混合动力车的市场竞争力, 结果表明, 基本情景下插电式混合动力无竞争力, 政府补贴情景下在使用 4~5 年时体现竞争力, 油价以每年 10% 的速度上涨的情景下可在使用 7~8 年后显示竞争力。

关键词: 插电式混合动力汽车; 消费者拥有成本; 购置成本; 使用成本

中图分类号: F 407.2

文献标识码: A

Consumer Ownership Cost Model of Plug-in Hybrid Vehicle

WANG Ning^{1,2}, GONG Zaiyan^{1,2}, ZHAO Jie¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Center for Automotive Industry, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Advisor was adopted to define structures and power trains of parallel plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), and two PHEV models with different battery electric ranges of 20 km and 60 km were established. The consumer total ownership cost models were established on the basis of the purchase and use cost and compared with conventional vehicles (CVs) and conventional hybrid vehicles. Three scenarios were given about the basic, government subsidies and high oil price and an analysis was made of the PHEVs' market competitiveness during 15 years nominal lifecycle. The results show that in basic scenario, PHEVs do not have competitiveness; with government subsidies, PHEVs will be competitive after 4~5 years' running; in high oil price scenario with 10% annual growth rate, PHEVs will be competitive after 7~8 years.

Key words: plug-in hybrid vehicle; customer ownership cost; purchasing cost; use cost

21 世纪是人类社会面临空前的能源和环境挑战的世纪。电动汽车因其良好的节能减排效益得到国内外学者的高度重视。Georg^[1]分析和比较了纯电动、混合动力汽车对能源安全和环境保护的作用。Carla 等^[2]研究了插电式混合动力车型的能耗、排放和成本。Mathew 等^[3]研究发现拥有 150 km 续驶里程的纯电动车能够在技术、成本、性能和效率上满足消费者的大部分需求。Yetano 等^[4]通过调研指出私人消费者关注新能源汽车产品特性依次是: 车辆的购置和使用成本; 加注燃料间的续驶里程; 燃料加注的可及性; 多种能源使用的可能性; 温室气体减排。

通过以上文献可以发现, 消费者的购置和使用成本对插电式混合动力 (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) 的市场发展和应用起关键的决定性作用, 相关政策设计也需要了解消费者的拥有成本, 而目前基于消费者视角的定量研究还缺乏深入系统的分析。本文从技术特性出发, 利用 Advisor 对其关键技术结构和尺寸进行仿真, 分析其经济性, 在此基础上构建消费者拥有成本模型, 研究基本、政府补贴和石油涨价三种情景下其市场竞争力。

1 PHEV 工作模式

PHEV 通过能量控制策略确定汽车的电能和石油两种驱动能源使用的时间与方式, 从而实现电量消耗模式 (charging-depleting mode, CD), 电量保持模式 (charging-sustaining mode, CS), 常规充电模式中切换运转^[5]。

1.1 车辆模型

收稿日期: 2011-02-14

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2011AA11A287), 上海市科技发展基金软科学研究项目(11692103800)

第一作者: 王宁(1977—), 男, 讲师、管理学博士。主要研究方向为消费者行为与新能源汽车产业化。E-mail: wangning@tongji.edu.cn

本文选取的 PHEV20 km 和 PHEV60 km、传统混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)与传统内燃机汽车模型(conventional vehicle, CV)具有相同的等级. PHEV 采取并联布置结构.

1.2 整车参数与性能目标

本文参考了目前中国市场上主流的几款紧凑型燃油轿车, 设定车辆设计参数: 空气阻力系数为 0.30, 迎风面积为 2.1 m^2 , 滚动阻力系数为 0.008, 整备质量为 999 kg, 额定载质量为 136 kg, 车轮半径为 0.275 m, 平均电气系统负荷为 500 W. 性能目标: 百公里加速时间 13 s, 持续最高车速 $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 最大爬坡度 7.2%, 全电力行驶里程 CV、HEV 为 0 km, PHEV 分别为 20 和 60 km 两种情况, 初始车辆电池荷电状态(state of charge, SOC)(PHEV 在部分充电测试条件下)对于 HEV 为 65%, PHEV 为 35%.

1.3 电能消耗

根据美国环保署(EPA)对于 Chevrolet Volt 等 PHEV 车型的测试结果, 假设 PHEV 的电能消耗约为 $225 \text{ Wh} \cdot \text{km}^{-1}$, 另外考虑到电池效率以及为保障电池寿命而对结束 SOC 的要求, 只有 75%左右的电池能是可以转化为有效消耗能的.

1.4 出行习惯

为了分析不同使用群体充电习惯对燃料经济性的影响, 假设车辆充满电开始行程和车辆低 SOC 完全以电量保持模式开始行程的几率是一样高的.

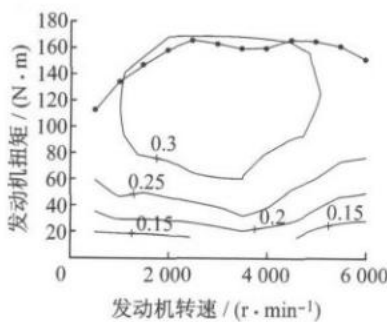


图1 Saturn 1.9L汽油发动机特征图
Fig.1 Saturn 1.9 L gasoline engine

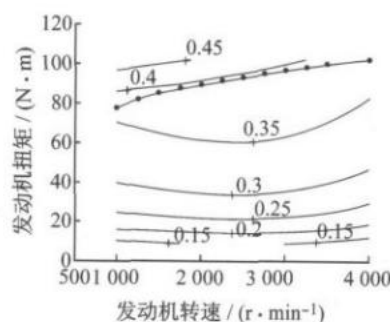


图2 Prius 1.5L汽油发动机特征图
Fig.2 Prius 1.5 L gasoline engine

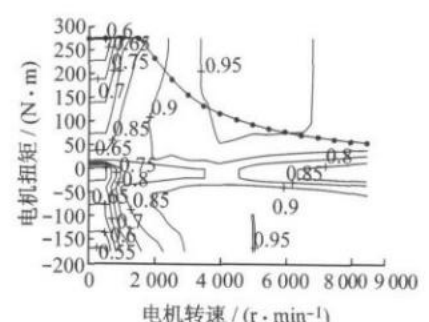


图3 PM 49 永磁同步电机特征图
Fig.3 PM 49 permanent magnet motor

2 PHEV 经济性分析

2.1 动力部件选型

基于紧凑型轿车的发动机特征, 选择 Saturn 1.9 L和 Prius2004 款 1.5 L 汽油发动机、本田 EV PLUS 使用的永磁同步无刷电机 MC_PM 49 作为 CV 和三款混合动力汽车的动力源. CV 发动机(FC_SI95)排量为 1.9 L, 最大功率为 95 kW($4\ 800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 最大扭矩为 $165 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($6\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 质量为 304 kg, 最高效率为 35%, 最大功率质量比为 0.3125. HEV/PHEV20 km/PHEV60 km 发动机(FC_PRUIS_IPN)排量为 1.5 L, 最大功率为 43 kW($4\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 最大扭矩为 $102 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($4\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 质量为 137 kg, 最高效率为 40%, 最大功率质量比为 0.313 9. 电机(MC_PM 49)额定电压为 288 V, 最大功率为 49 kW($1\ 700 \sim 8\ 750 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 最大扭矩为 $275 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($0 \sim 1\ 700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 质量为 60 kg, 最高效率为 96%, 最大功率质量比为 0.816 7. 速度—扭矩特征见图 1~图 3. HEV 选择 ESS_NIMH6 电池, 单个电池模块质量为 1 kg, 比功率为 $800 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比能量为 $40 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, 功率能量比为 20. PHEV20 km 与 PHEV60 km 选择 ESS_NIMH45_OVONIC 电池, 单个电池模块质量为 8.4 kg, 比功率为 $393 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比能量为 $71 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, 功率能量比为 5.5.

2.2 动力部件参数优化

根据电池的基本性能, 可以计算 PHEV20 km 和 PHEV60 km 动力电池分别需要 10 个和 30 个电池模块. 对于普通 HEV 则参照丰田 Prius 选用 40 个电池模块. 基于 ADVISOR 软件的自动优化系统计算获得动力部件参数 CV 发动机最大功率为 95 kW; HEV 发动机最大功率为 67 kW, 电机最高功率

为 44 kW, 电池模块数量为 40, 功率为 32 kW, 能量为 1.6 kWh; PHEV20 km 发动机最大功率为 61 kW, 电机最大功率为 51 kW, 电池模块数量为 10, 功率为 33 kW, 能量为 6.0 kWh; PHEV60 km 发动机最大功率为 38 kW, 电机最大功率为 75 kW, 电池模块数量为 30, 功率为 99 kW, 能量为 17.9 kWh.

2.3 Advisor 仿真经济性分析

本文建立嵌入 Advisor 的 PHEV 仿真模型(图 4)。借鉴美国汽车工程师协会(SAE)的《J1711 混合动力汽车排放和能量消耗试验方法推荐规程》。采用美国环保局城市行驶循环(urban dynamometer driving schedule, UDDS)和高速行驶循环(highway fuel economy cycle, HWFET)两个工况,引入利用

系数(utility factor, UF)以确定驾驶过程中电量消耗和电量保持不同模式所占的权重,进行经济性评价。经过计算得到燃油经济性见表 1,纯电动行驶经济性见表 2,引入 UF 值的 PHEV 燃料经济性见表 3,最终 PHEV 燃料经济性见表 4。

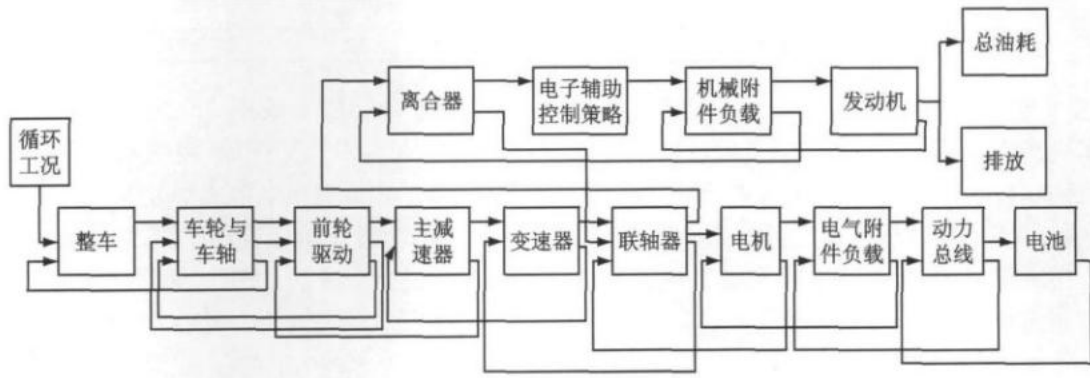


图 4 PHEV 顶层模块

Fig. 4 PHEV top-level module

表 1 部分充电测试阶段(PCT)汽油经济性水平

Tab. 1 Fuel economy in the partial charge test (PCT)

测试阶段	测试对象	循环	CV	HEV	PHEV20 km	PHEV60 km
PCT 测试	汽油燃油经济性/(L · 100 ⁻¹ · km ⁻¹)	UDDS	8.58	7.40	6.70	6.05
		HWFET	6.06	5.55	5.37	4.92
		复合工况	7.45	6.56	6.10	5.54

表 2 完全充电测试阶段(FCT)电力经济性水平

Tab. 2 Electricity economy in the full charge test (FCT)

测试阶段	测试对象	循环	CV	HEV	PHEV20 km	PHEV60 km
FCT 测试	电力消耗/kWh	UDDS			4.5	11.5
		HWFET			4.0	10.0
	全电力里程/km	UDDS			23.36	60.96
		HWFET			22.40	60.64
	电量经济性/(Wh · km ⁻¹)	UDDS			192.64	188.65
		HWFET			178.57	164.91
当量燃油经济性/(L · 100 ⁻¹ · km ⁻¹)	复合工况			186.31	177.97	
	UDDS			2.17	2.12	
	HWFET			2.01	1.86	
	复合工况			2.10	2.00	

表 3 计入利用系数(UF)的权重后燃料经济性水平

Tab. 3 Fuel economies with a consideration of the UF weight

测试阶段	测试对象	循环	CV	HEV	PHEV20 km	PHEV60 km
FCT, UF 计算	UF	UDDS			0.24	0.49
		HWFET			0.23	0.49
	计入 UF 权重后当量燃料经济性水平/(L · 100 ⁻¹ · km ⁻¹)	UDDS			5.61	4.12
		HWFET			4.60	3.42
		复合工况			5.16	3.81

3 PHEV 消费者拥有成本模型

消费者总拥有成本是指在拥有及使用汽车过程

中累计发生的经济成本,在本文中主要包括购置成本和使用成本。

3.1 购置成本

购置成本由整车制造装配成本(直接成本)、间

接成本和税收优惠三部分组成. HEV 与 CV 两类车辆有相似的车身和底盘部件, 约占全车成本的 70%

~80%^[6]. 针对 PHEV, 只估计比较独特的发动机系统、电机系统、电池系统和充电装置成本.

表 4 最终汽车燃料经济性水平比较

Tab. 4 Comparison of final fuel economies

测试对象	循环	CV	HEV	PHEV20 km	PHEV60 km
最终当量燃油经济性水平/(L·100 ⁻¹ ·km ⁻¹)	UDDS	8.58	7.40	6.16	5.09
	HWFET	6.06	5.55	4.98	4.17
	复合工况	7.45	6.56	5.63	4.67
相对 CV 经济性提高比例/%			12	24	37

3.1.1 整车制造装配成本

整车制造装配成本主要由车辆基础部件制造成本、发动机成本、电机成本、电池组成本、充电装置等 5 个部分构成. 发动机价格由发动机本身价格和热管理系统价格决定^[7]. 根据市场上常见直列四缸发动机成本和制造企业内部访问数据进行回归分析^[8], 得到经验公式 $C_{L4} = 84P + 2\ 968$, $C_{TM} = 1.652P$. 其中 C_{L4} 为发动机成本, C_{TM} 为热管理系统成本, P 为发动机最大功率. CV, HEV, PHEV20 km, PHEV60 km 的发动机系统总成本分别为: 发动机成本 10 948, 8 596, 8 092, 6 160 元; 热管理系统成本为 156.94, 110.684, 100.772, 62.776 元.

整个电机系统主要包括的部件是: 电机, 电机控制器和电机热管理设备. 根据本文研究中假设量产 10 万台的规模, 其成本根据市场上电机成本和制造企业内部访问数据进行类比, 得到电机系统成本估算公式: $C_M = 95.9P_M + 1\ 330$, $C_{MC} = 55P_M + 1\ 055$, $C_{MTM} = 7P_M + 500$. 其中 C_M 为电机成本, P_M 为电机最大功率, C_{MC} 为电机控制器成本, C_{MTM} 为电机热管理系统成本. HEV 电机系统成本为: 电机成本 5 549.6 元, 电机控制器成本 3 475 元, 电机热管理系统成本 798 元; PHEV20 km 电机系统成本为: 电机成本 6 220.9 元, 电机控制器成本 3 860 元, 电机热管理系统成本 847 元; PHEV60 km 电机系统成本为: 电机成本 8 522.5 元, 电机控制器成本 5 180 元, 电机热管理系统成本 1 015 元. 此外对于 CV 来说, 需要安装启动电机, 本文调查了市场上类似车辆采用的电机, 估计成本为 300 元左右.

电池组的成本主要取决于电池存储能量的大小. 基于美国能源局(EIA)2005 年镍氢电池(NiMH)成本大约在 900~1 200 美元·(kWh)⁻¹^[9], 根据美国加州电能研究院(CEI)的 Kalhammer 教授 2007 年预测电池成本与电池的功率能量比呈现一定关系^[10], 得到电池成本估算公式: $C_{B_HEV} = 5\ 180E$, $C_{B_PHEV20} = 3\ 710E$, $C_{B_PHEV60} = 2\ 450E$. 其中 C_{B_HEV} , C_{B_PHEV20} , C_{B_PHEV60} 分别为 HEV, PHEV20 km,

PHEV60 km 电池成本, E 为电池能量. HEV, PHEV20 km, PHEV60 km 电池能量分别为 1.6, 6, 17.9 kWh, 由此得出电池成本分别为 8 288, 22 260, 43 855 元. 对于 CV 而言, 电气系统蓄电池成本估计为 300 元左右. 对于 PHEV 而言, 需要一套能够将交流电转化为直流电并存储在动力电池中的充电装置, 价格约为 3 000 元左右^[2]. 对于一辆量产的普通紧凑型车辆(CV 总重量为 1 320 kg)而言, 其基础部件的成本约为 6 万元左右^[7]. 按照前面的分析, 可以估算出 CV, HEV, PHEV20 km, PHEV60 km 的制造装配成本(直接成本)分别为 71 705, 86 817, 104 381, 127 795 元. 整车制造成本各部分比例见图 5, 电池成本分别占到了 PHEV20 km 和 PHEV60 km 的 21% 和 34%.

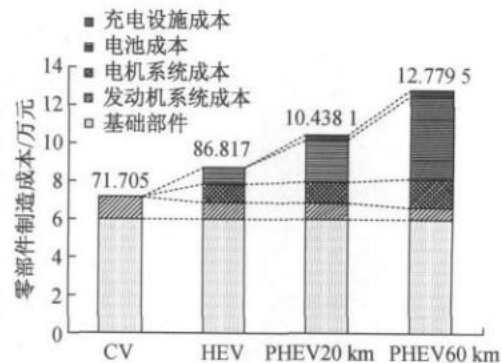


图 5 仿真车辆零部件制造成本关系图

Fig. 5 Manufacturing costs of simulated vehicle parts

3.1.2 间接成本

间接成本包括: 生产管理成本、企业运营管理成本、销售成本、利润等. 本文通过各大汽车企业年报(2006 年~2008 年)和企业内部专业人士访谈, 估算汽车行业各大厂商在生产销售环节的中间成本与直接成本之间的比例关系, 根据公式: $C_i = C_m u$, 其中 C_i 为间接成本, C_m 为整车制造成本, u 为当量系数. 各大厂商当量系数均在 0.45~0.49 之间, 本文取 $u = 0.47$, 计算得到 CV, HEV, PHEV20 km, PHEV60 km 的间接成本分别为 33 701, 40 804, 49 059, 60 064 元.

3.1.3 政府税收

按照我国现有汽车消费政策,消费者支付的购置税为零售价格扣除增值税之后的10%,CV,HEV,PHEV20 km,PHEV60 km零售价格分别为104 689,126 753,152 396,186 581元;消费者需要支付的购置税分别为8 948,10 834,13 025,15 947元;消费者购置成本(含税)分别为:113 637,137 587,165 421,202 528元。

3.2 使用成本

3.2.1 燃料费用

使用成本主要包括燃料(汽油和电能)费用和维护费用。首先根据国家商务部的相关规定,车辆的名义寿命假设为15年或者 60×10^4 km,取决于哪一个先达到。其次是计算车辆的出行规律,即一般的消费者使用车辆的频度、时间、距离等的平均值。本文根据同济大学汽车营销管理学院在2010年对80位上海车主出行规律做的为期10 d的身访调研(委托专业的调研公司随车出行调研),来确定本次研究中的消费者出行规律。得出平均日行驶里程54.9 km,年均行驶里程20 038.5 km,PHEV20 km和PHEV60 km全电力行驶概率分别为0.4和0.76。在此基础上,根据2011年8月上海93号汽油的价格为7.79元 \cdot L $^{-1}$;其次是上海地区按照民用电价0.617元 \cdot (kWh) $^{-1}$ (假设未来5年电费水平基本不变,PHEV的平均充电效率为85%),汽车充电的电费成本为0.726元 \cdot (kWh) $^{-1}$,可以计算出燃料的消耗费用:CV百公里油耗7.4 L,年均汽油消耗1 483 L,年均汽油费用11 551元;HEV百公里油耗6.6 L,年均汽油消耗1 323 L,年均汽油费用10 303元;PHEV20 km年均电力、汽油行驶里程分别为8 015,12 023 km,百公里耗电和油耗为19 kWh,6.1 L,年平均电力、汽油消耗1 523 kWh,733 L,年均电费和汽油费为1 106,5 714元,年均燃料消耗费用6 820元;PHEV60 km年均电力、汽油行驶里程分别为15 229,4 809 km,百公里耗电和油耗为18 kWh,5.5 L,年平均电力、汽油消耗为2 741 kWh,265 L,年均电费和汽油费为1 990,2 061元,年均燃料消耗费用为4 051元。

3.2.2 维护费用

PHEV没有市场化销售,维护费用较难量化。因此本文利用传统内燃机汽车的维护费用数据作为基础,重点列出因为能量结构转变而影响的维修类别,主要是因为内燃机系统的简化或者使用减少而节约费用,通过同济新能源汽车工程中心专家访谈的方

法确定PHEV的维护费用。CV,HEV,PHEV20 km,PHEV60 km生命周期维护费用总计分别为41 625,40 125,35 625,33 000元,包括:机油滤清器替换分别为8 250,7 200,4 500,3 000元;空气滤清器替换分别为975,825,525,0元;火花塞替换分别为900,600,600,0元;正时链替换分别为1 500,1 500,0,0元;其他共有维护项目为30 000元。由此可得出年均维护费用分别为2 775,2 675,2 375,2 200元。

3.3 消费者持有成本模型

从消费者角度而言,拥有一辆汽车的成本包括购买成本和使用成本。其中购买成本是固定成本,包括整车制造成本和政府相关税收;而使用成本主要由车用能源消耗成本和车辆维护成本构成,是随着车辆运行年限变动的成本。根据以上分析得出消费者车辆总拥有成本如下:

$$C_{\text{total}} = C_m + C_i + C_t + C_c + C_v \quad (1)$$

式中: C_{total} 为消费者拥有成本; C_m 为整车制造成本; C_i 为间接成本; C_t 为政府税收; C_c 为能源消耗成本; C_v 表示维护成本。

虽然PHEV在车辆制造环节成本会高于CV和HEV,但是消费者仍然能够通过车辆使用阶段的能耗成本节约来得到一定的经济收益(图6)。

根据目前新能源汽车的发展情形,可以定义3种情景,基本情景:油价维持在7.79元 \cdot L $^{-1}$,没有政策支持。油价上涨情景:在基本情景的基础上,统计1998年至2010年国内油价变化趋势,进行回归,求得油价年均增长率为9.94%,故假设15年内每年油价上升10%。政策支持情景:PHEV作为一种节能环保的新型能源形势,在推广初期,各级政府可以适当通过经济杠杆或者直接财政补贴的方式在车辆发展的不同阶段施加不同形式、不同力度的激励。根据我国《关于开展私人购买新能源汽车补贴试点的通知》,对PHEV按照动力电池容量给予一次性3000元 \cdot (kWh) $^{-1}$ 的补贴,最高不超过5万元,则PHEV20 km和PHEV60 km分别可获1.8万元和5万元的补贴;HEV作为1.6 L以下节能车型可获一次性3 000元补贴,可以被视作是政府补贴情景。由此可以计算4款仿真车型消费者在三种不同情景下总拥有成本关系(图7~图9)。

从图7中可知,虽然PHEV在使用成本方面因为较好的燃料经济性和较低的维护费用,具有比较明显的优势;但是因为初始购置成本过高,因此在车辆行驶生命周期的绝大部分时间,消费者总拥有成

本要高于普通内燃机汽车,只有到第 11 年才开始体现出比微弱的成本优势.从图 8 中可知,即使没有政府补贴的情况下,如果油价继续像现在一样保持上升通道,车主也能在第 7~8 年左右收回差价.汽油

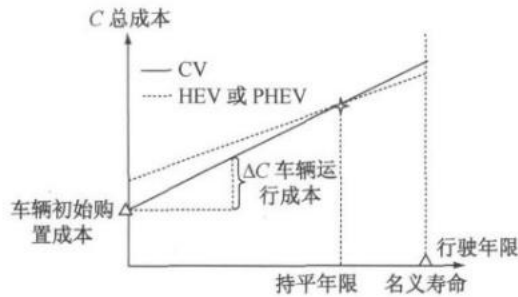


图 6 持平分析法

Fig.6 Equilibrium analysis

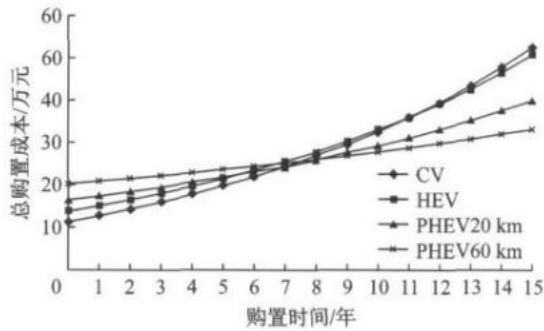


图 8 油价上涨情景仿真车辆拥有成本

Fig.8 Ownership cost in high oil price scenario

价格的长期上升趋势,对新能源汽车的发展来说是长期利好的.从图 9 中可知,在政府财政补贴的支持下,PHEV 在 4~5 年内多支付的购置成本可以得到补偿.

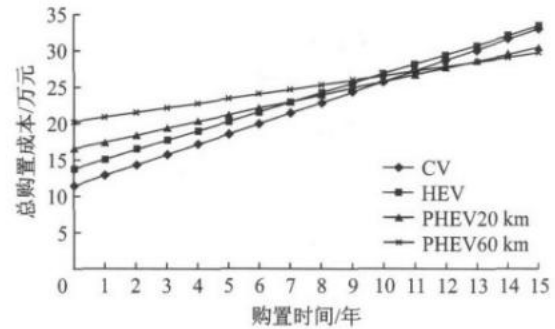


图 7 基本情景仿真车辆拥有成本

Fig.7 Ownership cost in original situation

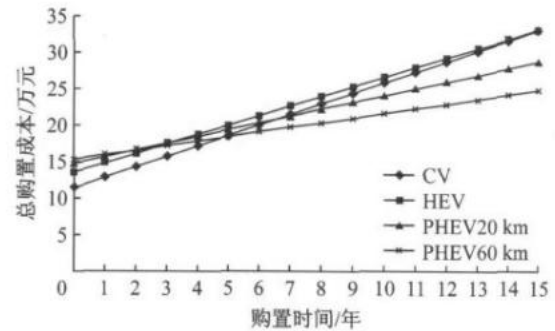


图 9 政府补贴情景仿真车辆拥有成本

Fig.9 Ownership cost in subsidies scenario

4 结论

本文基于基本情景、政府补贴、油价上涨三种情景分析了 PHEV 消费者全生命周期拥有成本,可以发现目前的补贴政策标准在 5 年之内具有明显的作用,随着电池成本和整车购置价格的降低,相关购车补贴政策可以减弱或取消.油价是 PHEV 商业化应用的敏感因素,购车补贴的标准可以随着油价上涨速度的不同进行适当的调整.另外实际运营过程还要充分考虑基础设施的建设和运营问题,所以真正商业化可能需要更长的一段时间.

参考文献:

- [1] Georg H K. The history of alternative fuels in transportation; the case of electric and hybrid cars[J]. Utilities Policy, 2008 (16): 63.
- [2] Carla S, Marc R, Thiago F. Evaluation of energy consumption, emission and cost of plug-in hybrid vehicles[J].

Energy Conversion and Management, 2009(50): 1635.

- [3] Mathew W, Michael F, Schwartz P. Batteries; lower cost than gasoline? [J]. Energy Policy, 2009(37): 2465.
- [4] Yetano R M, Susana M, Manfred F. Public attitudes towards and demand for hydrogen and fuel cell vehicles; a review of the evidence and methodological implications[J]. Energy Policy, 2009, 10(38): 5301.
- [5] Amjada S, Neelakrishnana S, Rudramoorthy R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010, 14(3):1104.
- [6] Graham R. Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options[R]. [S.l.]:EPRI, 2001.
- [7] 范明珠. 中国燃料电池汽车产业化消费者持有成本角度分析[D].上海:同济大学汽车学院,2007.
FAN Mingying. Analysis of customer total ownership cost of fuel cell vehicle industrialization in China [D]. Shanghai: Tongji University. College of Automotive Studies, 2007.
- [8] 赵洁. 基于 Advisor 建模的插电式混合动力汽车消费者拥有成本分析[D].上海:同济大学汽车学院,2010.
ZHAO Jie. Analysis of customer total ownership cost of plug-in vehicle based on ADVISOR simulation[D]. Shanghai: Tongji University. College of Automotive Studies, 2010.

- [9] Timothy L E. A retail and lifecycle cost analysis of hybrid electric vehicles[J]. Transport and Environment, 2006, 11(2):115.
- [10] Kalhammer F R. Status and prospects for zero emissions vehicle technology [R]. [S. l.]: ARB Independent Expert Panel, 2007.

(上接第 792 页)

2-opt 优化及信息素更新等策略,实现了蚁群算法对多物流中心选址问题的直接求解. 仿真算例及算法比对表明,本算法是求解多配送中心选址问题的较好选择.

表 3 IACA 算法和 GA 算法计算结果比较

Tab.3 Results comparison between IACA and GA

算法	配送中心编号	服务配送点编号	配送规模	服务总成本
IACA 算法	8	12,16,21,9,14	7.4	402.1
	6	20,19,10,18	5.3	
	5	7,17,27,11,1,4	10.1	
	4	6,2,22,25,8	4.6	
	2	13,3,15,26,24,23,5	5.2	
	6	20,19,10,18	5.3	
GA 算法	5	7,17,27,11,1,4	10.1	415.8
	4	6,2,22,25,8	4.6	
	2	13,3,15,26,24,23,5	5.2	
	1	12,16,21,9,14	7.4	

参考文献:

- [1] Da Gama F S, Captivo M E. A heuristic approach for the discrete dynamic location problem[J]. Location Science, 1998(6): 211.
- [2] Konstantinos G Z, Konstantinos N A. A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 152: 507.
- [3] 张潜, 高立群, 刘雪梅, 等. 定位-运输路线安排问题的两阶段启发式算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(7): 773.
- ZHANG Qian, GAO Liqun, LI Xuemei, et al. A two-phase heuristic approach to the location routing problem[J]. Control and Decision, 2004, 19(7): 773.
- [4] Dorigo M, Gambardella L M. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1996, 26(1): 29.
- [5] 闻育, 吴铁军. 基于蚁群算法的城域交通控制实时滚动优化[J]. 控制与决策, 2004, 19(9): 1057.
- WEN Yu, WU Tiejun. Real-time rolling horizon optimization of urban traffic control based on ant algorithm[J]. Control and Decision, 2004, 19(9): 1057.
- [6] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53.
- [7] 周爱莲. 企业物流系统网络节点选址方法及应用研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2007.
- ZHOU Ailian. Research on the method and application of nodes location of enterprises logistics network [D]. Nanjing: Southeast University. College of Transportation, 2007.
- [8] Frieze A M. An extension of Christofides heuristics to the k -person traveling salesman problem [J]. Discrete Applied Mathematics, 1983(1): 79.
- [9] Thomas S, Holger H H. MAX-MIN ant system[J]. Future Generation Computer System, 2000, 16(8): 889.