

# 混合动力汽车全寿命周期成本计算模型及分析

曾 鸣, 史 慧

(华北电力大学经济与管理学院能源与电力经济研究咨询中心, 北京 102206)

## Model and Analysis on Total Life Cycle Cost Estimation of Hybrid Electric Vehicles

ZENG Ming, SHI Hui

(Research Advisory Centre of Energy and Electricity Economics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘 要:** 为了定量分析混合动力汽车 (hybrid-electric vehicle, HEV) 的环境效益和全寿命周期内的综合成本, 首先, 从外部环境成本和直接经济成本两个方面, 分析了 HEV 全寿命周期成本的构成; 在此基础上, 分别建立了混合动力汽车的外部环境成本模型和直接经济成本模型; 从车型和时间两个维度, 提出了基于分步叠加思想的计算方法; 最后, 通过算例, 将混合动力汽车的环境和经济效益与传统汽车进行了对比, 并就能源价格和碳排放价格对 HEV 的影响做了敏感性分析。结果表明, 在设定条件下 HEV 全寿命周期成本要低于传统汽车, 发展 HEV 符合经济性和可持续性要求。

**关键词:** 混合动力汽车; 全寿命周期; 外部环境成本; 直接经济成本; 碳排放价格; 敏感性分析

**Abstract:** To quantify the environmental benefits of hybrid electric vehicles and comprehensive cost in total life-cycle, the structure of total life cycle costs of hybrid vehicles is put forward from two aspects, the external environmental cost and the direct economic cost of hybrid vehicles. Base on this, an external environmental cost estimation model and a direct economic cost model of hybrid vehicles are established respectively, in which a superimposed step-by-step calculation method is presented from two dimensions of vehicle type and time. In the end, the environmental and economic benefits between hybrid vehicles and conventional cars are compared by an example, and the sensitivity on energy price and carbon price is analyzed. The results show that the life cycle cost of the hybrid vehicles in specific conditions is lower than that of conventional cars, and the development of hybrid electric vehicles meet the economy and sustainability requirements.

**Keywords:** hybrid vehicles; total life cycle; external environmental costs; direct economic costs; carbon price; sensitivity analysis

## 0 引 言

随着石油资源的日趋枯竭以及环境污染的不断加剧, 混合动力汽车 (Hybrid-Electric Vehicle, HEV) 作为当前技术最为成熟的电动汽车, 成为了世界各国的关注焦点和研究重点。特别是在定量分析 HEV 的环境效益和全寿命周期内的综合成本评估方面, 引起了国内外专家的普遍关注。

目前, 在能源价格对 HEV 的影响和全寿命周期直接成本分析<sup>[1]</sup>等方面, 国内外专家进行了较为深入的研究。文献 [2] 从购置成本和使用成本两个角度出发建立了消费者拥有成本模型, 并通过该模型将 HEV 与传统汽车进行了对比分析, 结果表明从长期来看 HEV 具有较大的竞争力。文献 [3] 建立了一个强混合动力汽车的成本分析模型, 对其全生命周期的成本进行了预测, 从而得出了强混合动力汽车在高油价条件下有着显著的成本优势。文献 [4] 以全寿命周期理论为基础, 通过对电动汽车全寿命期内的环境效益的分析表明, 普及电动汽车有助于节能减排目标的实现<sup>[5]</sup>。文献 [6] 则从消费者角度建立了电动汽车的全寿命周期成本模型, 为电动汽车的保有成本估算提供了新方法。但同时, 当前对于 HEV 生产和技术成本较高的现状<sup>[7]</sup>缺乏对比分析, 对其外部成本也缺乏量化工具, 因此对 HEV 的外部成本和全寿命期内综合成本的研究具有重要意义。

本文综合考虑了汽车生产使用过程中产生的外部环境成本和直接经济成本, 构建了 HEV 全寿命周期成本估算模型。通过与传统汽车的对比分析, 指出未来 HEV 发展的优势。同时, 就能源价格和

碳排放价格对 HEV 的影响做了敏感性分析，得到了 HEV 各车型相应的盈亏平衡点。

## 1 HEV 全寿命周期成本估算模型

### 1.1 模型概述

本文构建的 HEV 全寿命周期成本估算模型包括外部环境成本模型和直接经济成本模型两部分。结合 HEV 的特点以及全寿命周期的理论，将汽车的全寿命周期分为 4 个阶段，即材料生产阶段、装配阶段、运输阶段和使用阶段。其中外部环境成本是指汽车全寿命周期 4 个阶段对应于汽车生产和使用过程中产生的温室气体排放相关的成本；而直接经济成本是指电动汽车行驶过程中所消耗燃料的费用。

HEV 全寿命周期成本估算模型的假设条件如下：

① 根据美国空气资源委员会 (CARB) 认定，CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFC-134a (HFC：氢氟碳化物) 和 HFC-152a 是 HEV 全生命周期内排放的主要温室气体。本文在建模过程中采用全球变暖潜力 (Global Warming Potential, GWP) 指标将上述几种温室气体统一转化为碳当量进行量化计算。

② 由于 HEV 的行驶范围受到诸多因素限制，为了简化计算，本文仅考虑市内道路和高速公路范围内行驶的电动汽车，并将市内行驶和高速公路行驶比例设为 ρ<sub>1</sub> : ρ<sub>2</sub> (ρ<sub>1</sub> + ρ<sub>2</sub> = 1)，该比例与用户行为直接相关。车型则根据汽车排放量分为 3 类：第一类排量在 1.5L 以内，称为小型车；第二类排量在 1.6L~3.5L，称为中型车；第三类排量在 3.5L 以上，称为大型车。

③ HEV 的动力能源包括汽油及电能两类。

④ 本文考虑了货币的时间价值，以净现值 (Net Present Value, NPV) 作为评价指标。

### 1.2 建立模型

#### 1.2.1 外部环境成本模型

汽车生命周期内碳当量排放量如公式(1)所示：

$$E_t = \sum_{GHG} \left( \sum_{LS} E_{i,LS} \right) \times GWP_i \quad (1)$$

式中：GHG 表示温室气体种类集合；E<sub>1</sub> 表示生命周期内所有温室气体排放总量；E<sub>i,LS</sub> 表示温室气体 i 在 LS 阶段的排放量；LS 表示汽车全寿命周期中划分的阶段集合，包括材料、装配、运输和使用阶段；GWP<sub>i</sub> 表示温室气体 i 的 GWP 值。

第 t 年销售的汽车的温室气体总排放量：

$$E_t = \sum_{k=1}^3 (Q_t \times \eta_k) E_{1,k} \quad (2)$$

式中：E<sub>t</sub> 表示第 t 年汽车温室气体总排放 (转化为碳当量)；Q<sub>t</sub> 表示预测第 t 年汽车总销量；η<sub>k</sub> 表示预测第 k 种车型在当年的销售比例；E<sub>1,k</sub> 表示第 k 种车型寿命周期内温室气体碳当量排放总量。

外部环境成本总计：

$$C_w = \sum_{t=0}^T [E_t p_{car} (1+r)^{-t}] \quad (3)$$

式中：C<sub>w</sub> 表示 k 种车型带来的外部成本 (基准年现值) 总计；t 表示从基准年开始计算的第 t 年；T 表示本文设定的模型时间边界；p<sub>car</sub> 表示单位碳当量的环境成本；r 表示折现率。

#### 1.2.2 直接经济成本模型

第 t 年 k 车型的动力费用：

$$C_{k,t} = \frac{m_k \eta}{(\rho_1 g_c + \rho_2 g_h)} \times P_{energy} + \frac{m_k (1 - \eta)}{(\rho_1 g_c + \rho_2 g_h)} \times P_e \quad (4)$$

式中：C<sub>k,t</sub> 表示第 t 年 k 车型的年动力费用；m<sub>k</sub> 表示 k 车型的年行驶里程数；η 表示 HEV 使用汽油行驶里程的比重；ρ<sub>1</sub> 表示汽车在市内行驶的比重；g<sub>c</sub> 表示城市道路上燃料的额定经济性，即每英里消耗的汽油或电量；ρ<sub>2</sub> 表示汽车在高速公路行驶的比重；g<sub>h</sub> 表示高速公路上燃料的额定经济性；P<sub>energy</sub> 表示能源价格；P<sub>e</sub> 表示 HEV 的充电电价。

全寿命周期内汽车直接经济成本：

$$C_{k,l} = P_b + \sum_{t=0}^N [(C_{k,t} + OC_{k,t}) \times (1+r)^{-t}] \quad (5)$$

式中：C<sub>k,l</sub> 表示 k 车型全寿命周期内直接经济成本总和；P<sub>b</sub> 表示汽车直接购买费用；N 表示机动车平均寿命周期；OC<sub>k,t</sub> 表示第 t 年 k 车型的检修成本。

直接经济成本总计：

$$C_d = \sum_{k=1}^3 \sum_{t=0}^T (C_{k,t} Q_t \eta_k) \quad (6)$$

式中：C<sub>d</sub> 表示直接经济成本总和。

#### 1.2.3 求解思路

模型求解思路和模型建立思路基本一致，分为直接经济成本和外部环境成本两条线路，如图 1 所示。

根据图 1 所示逻辑结构，从车型和时间两个维度出发，从左到右采用分步叠加思想进行计算，最后归总到“成本总计”，并进行传统汽车和 HEV 的环境和经济效益进行对比。之后，对模型决策变量进行敏感性分析，以进一步确定能源市场和碳交

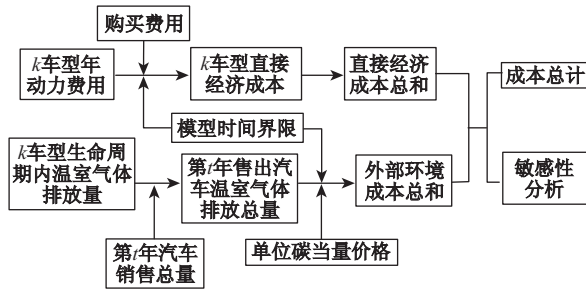


图1 模型求解流程图

易市场发展趋势对 HEV 未来发展的影响。

## 2 算例分析

### 2.1 基础数据

以某地区电动汽车发展为例，结合该地区实际情况对该地区电动汽车未来发展的经济合理性做一个分析。该地区年均销售汽车 120 万辆，小型车、中型车和大型车的比例约为 47% : 31% : 22%， $\rho_1 : \rho_2 = 0.55 : 0.45$ ，模型时间边界  $T$  设定为 15a。假设机动车的平均寿命周期  $N$  为 12a，一辆汽车寿命周期内行驶里程为 240 000km，则平均年行驶里程 20 000km。算例通过与传统汽车全寿命周期内成本的对比，确定 HEV 的经济性，涉及的经济指标，无特殊说明均以单位车辆作为研究对象(美元/辆)。

主要温室气体的全球变暖潜力如表 1 所示。

表 1 主要温室气体 GWP 值

温室气体	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFC-134a	HFC-152a
GWP 值	1	23	296	1 300	120

来源：IPCC，第三次评估报告，2003。

根据表 1 中的 GWP 值，可以将汽车全寿命周期内产生的温室气体统一转化为碳当量(kg, CO<sub>2</sub>e)，各阶段所需材料及相应气体排放等基础数据参见文献 [8]，转化结果如表 2 所示。

表 2 中，传统汽车每车全寿命期内排放 212.77t 碳当量气体，HEV 排放 138.23t 碳当量气体，后者低 35%，由此可见 HEV 具有明显的环境效益。两者之间的排放差别主要存在于材料生产阶段和使用阶段。其中，由于 HEV 生产所需材料要求精度高、质量好，相应的耗能也高，因而在材料生产阶段 HEV 的气体排放要比传统汽车高出 17.2%；

表 2 全寿命周期内各温室气体碳当量值 kg

车型	材料生产阶段	装配阶段	运输阶段	使用阶段	合计	
传统汽车	小型车	7 108	565	113	53 696	61 482
	中型车	7 941	692	136	62 598	71 367
	大型车	9 005	815	162	69 942	79 924
	总计	24 054	2 072	411	186 236	212 773
HEV	小型车	8 200	621	121	28 204	37 146
	中型车	9 274	761	146	37 347	47 528
	大型车	10 719	896	170	41 766	53 551
	总计	28 193	2 278	437	107 317	138 225

而在使用阶段，传统汽车气体排放量高出 42.8%。

CO<sub>2</sub> 价格取决于多种因素，包括世界能源价格、节能减排技术的发展和世界经济发展情况等。本文采用 IPCC 2005 年报告中的评估数据，CO<sub>2</sub> 的社会成本定为 12 美元/t。汽油价格按照 2013 年 2 月美国市场牌标价折算，约为 0.901 5 美元/L。HEV 充电电价为 0.5 元/kWh，单位电能碳排放 0.938kg/kWh<sup>[9]</sup>。

### 2.2 模型计算

将以上基本数据带入式(1)~式(6)，得到年动力费用和检修费用，作为求解模型的基础。具体动力费用和检修费用如表 3 所示。

表 3 年动力费用和检修费用对比表 美元

费用	传统汽车			HEV		
	小型车	中型车	大型车	小型车	中型车	大型车
年动力费用	926	1 288	1 684	622	1 053	1 353
年检修费用	2 150	2 488	2 720	2 340	2 575	2 660
年使用费用	3 076	3 776	4 404	2 962	3 628	4 013

通过表 3 的对比可以发现，HEV 的年动力费用同传统汽车要低 20%~30%，但是由于 HEV 对设备的要求较高，特别是电池的维护，所以年检修费用要高于传统汽车。总体来说，年使用费用 HEV 略高于传统汽车，幅度在 3% 以内。表 4 是考虑了货币时间价值之后，通过 5% 的基准折现率折现后的汽车全寿命周期直接经济成本。

表 4 中，HEV 直接经济成本要高于传统汽车。直接比较该成本传统汽车具有一定的优势，但是，本文立足于社会，将外部成本也考虑在内。外部成

表 4 全寿命期直接经济成本对比表

费用	传统汽车			HEV		
	小型车	中型车	大型车	小型车	中型车	大型车
购买费用/ 美元	16 000	28 000	35 000	22 000	32 000	40 000
年使用费用/ 美元(未折现)	3 076	3 776	4 404	2 962	3 628	4 013
直接经济 成本总计/ 万美元	44 627	63 141	75 985	49 565	65 763	77 346

本主要是指汽车使用过程中向环境排放的温室气体给环境造成的损害。根据之前模型和基础数据可以得到表 5。

表 5 全寿命期总成本对比表 万美元

成本	传统汽车			HEV		
	小型车	中型车	大型车	小型车	中型车	大型车
直接经济 成本	44 627	63 141	75 985	49 565	65 763	77 346
外部环境 成本	7 377.8	8 564	9 590.9	4 457.5	5 703.4	6 426.1
成本总计	52 004.8	71 705	85 575.9	54 022.5	71 466.4	83 772.1

从表 5 可以看出，HEV 的大、中、小型汽车全寿命周期总成本要比传统汽车分别低 1 803.8 万美元、238.6 万美元和(-2 017.7)万美元。可见，在本文的前提假设和现有条件下，发展大中型 HEV 比小型汽车更具有优势，但是优势并不明显，最具有经济性的大型 HEV 也只节约 3.5% 的成本。这主要与当前能源价格和碳排放价格处于较低水平，使得传统汽车使用成本较小有关。在本文建立的模型中，能源价格和碳排放价格作为成本节约量最主要影响因素之一，有必要就其对电动汽车经济性影响因素进行敏感性分析。

### 2.3 敏感性分析

由上文可知，能源价格和碳排放价格的变化直接 HEV 全寿命周期成本，进而影响电动汽车未来发展的经济合理性。因此，分析能源价格和碳排放价格对 HEV 经济性的影响具有重要意义。假设其它变量为默认值，对能源价格和碳排放价格展开敏感性分析，其中，折现率  $r=5\%$ ，汽车寿命年限  $N=12$ ，模型时间边界  $T=15$ 。

如表 6 所示，随着能源价格的上升， $S_{D-value}$  值相应变大，说明 HEV 更具备优势( $S_{D-value}$  值是  $C_{l,CV}$

和  $C_{l,HEV}$  之差)。  $C_{l,CV}$  和  $C_{l,HEV}$  分别表示传统汽车和 HEV 的外部成本和直接经济成本总和。  $S_{D-value}=0$  时对应的点即为电动汽车项目投资的盈亏平衡点。

表 6 能源价格敏感性分析 万美元

能源价格/ (美元/L)	小型车 $S_{D-value}$ 值	中型车 $S_{D-value}$ 值	大型车 $S_{D-value}$ 值
0.8	-2 669	-387	1 194
1.0	-1 980	192	1 783
1.2	-1 352	794	2 207
1.4	-687	1 310	2 676
1.6	29	1 748	3 241
1.8	745	2 185	3 807
2.0	1 361	2 623	4 373

由图 2 可以看出，大型车盈亏平衡点最小，小型车的最大。通过插值法可以计算出，大型、中型和小型车的能源价格盈亏平衡点  $K_{breakeven}$  分别为 0.43 美元/L，0.94 美元/L 和 1.59 美元/L。

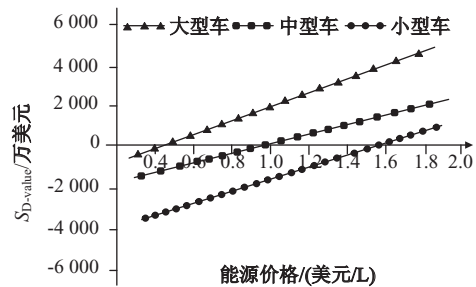


图 2 能源价格敏感性分析图

自 21 世纪初建立碳交易体系以来，碳排放价格一直处于波动阶段，而且地区间存在较大的差异性，因此，有必要进行碳排放价格对 HEV 成本效益影响的灵敏度分析。本文碳排放价格由  $p_{car}$  来表示，该参数的波动将直接影响着  $S_{D-value}$  的变化，对应的变化趋势如表 7 和图 3 所示。

表 7 碳排放价格敏感性分析 万美元

碳排放价格/ (美元/t)	小型车 $S_{D-value}$ 值	中型车 $S_{D-value}$ 值	大型车 $S_{D-value}$ 值
8	-4 450	-1 830	820
9	-3 843	-1 316	1 112
10	-3 236	-802	1 403
11	-2 631	-288	1 693
12	-2 018	239	1 804
13	-1 325	741	2 116
14	-634	1 248	2 423
15	27	1 759	2 734
16	813	2 280	3 050

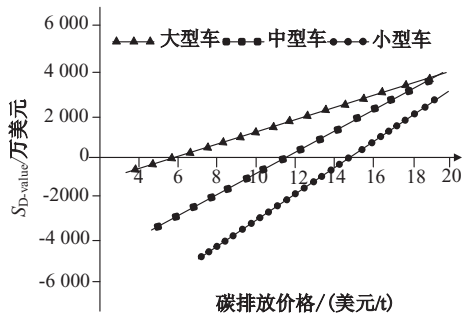


图3 碳排放价格敏感性分析图

图3中3类车型的发展趋势与图2中相类似,但是不同车型对碳排放价格的敏感程度与能源价格有所差别。从 $S_{D-value}$ 值来看,中型和小型车对碳排放价格更为敏感,这是由于中小型车的基数较大,碳排放价格的波动对 $S_{D-value}$ 的传导效应比大型车更大。目前碳排放价格还处于较低水平,因此大型车还是具备一定优势。

### 3 结论

本文从汽车的全寿命周期出发,构建了HEV环境和经济效益评价模型。模型根据汽车排量将其分为3个等级,在研究过程中除了考虑汽车购买和使用中产生的直接经济成本外,还引入了汽车从材料生产、装配、运输到使用等各个阶段温室气体排放所带来的外部成本。最后,通过算例验证了本文建立的模型的科学合理性。

结果表明,在既定的条件下,排量较大的HEV在未来更具备竞争力。这是因为排量大的HEV在社会成本的减少上效果更为显著,同时动力成本减少的幅度也更大。

通过分析以上模拟结果,给出以下建议:

①从全寿命视角出发,积极发展HEV制造技术,从原始材料入手减少车辆生产过程中的碳排放,从而提高HEV的竞争力;

②规范碳交易市场,建立科学合理的碳排放价格形成机制,从而借助碳交易市场力量促进HEV的推广使用;

③针对HEV构建能源价格激励措施,如充电电价补贴政策,从经济角度着手,推动HEV的普及。

#### 参 考 文 献

[1] Freire F, Marques P. Electric Vehicles in Portugal:

an integrated energy, greenhouse gas and cost life-cycle analysis [C]. IEEE Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2012 IEEE International Symposium, Boston, 2012: 1-6.

- [2] 王宁, 龚在研, 赵洁. 插电式混合动力汽车消费者拥有成本模型 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 793-799.
- [3] 马钧, 俞一鸣. 强混合动力汽车全生命周期成本研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2009, 33(4): 1-5.
- [4] 艾江鸿, 李海锋, 林鉴军. 电动汽车的全寿命周期环境影响分析 [J]. 技术经济, 2010, 29(3): 35-39.
- [5] 尤建新, 曹颖, 王春蕾. 国外混合动力汽车项目推广的启示 [J]. 价值工程, 2009(3): 114-117.
- [6] 任玉珑, 李海锋, 孙睿, 等. 基于消费者视角的电动汽车全寿命周期成本模型及分析 [J]. 技术经济, 2009, 28(11): 54-58.
- [7] Lin Chang-Pin, Chan I-Hsiang. Fuzzy Nonlinear Programming Based Life Cycle Cost Optimization for Hybrid Electric Vehicles [C]. IEEE Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium, Taichung, China, 2012: 282-285.
- [8] Davis S C, Diegel S W. Transportation Energy Data Book [R]. Oak ridge, TN: oak ridge national laboratory, 2003.
- [9] 叶斌, 陆强, 李继, 等. 煤电GHG排放强度模型及其应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(5): 125-130.
- [10] 杜恂, 孙玉坤. 混合动力汽车电驱动系统性能比较分析 [J]. 微电机, 2007, 30(4): 61-63.
- [11] 王金南. 能源与环境 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [12] 艾江鸿, 夏德建, 任玉珑. 电动汽车3E评价与协调发展探析 [J]. 技术经济, 2010, 29(4): 26-33.

收稿日期: 2013-04-28

作者简介:

曾鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、低碳电力系统等, E-mail: zengmingbj@vip.sina.com.cn;

史慧(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行、分布式发电, E-mail: shihui0814@126.com.

(责任编辑: 林海文)