第 16 卷　第 14 期　2016 年 5 月
1671—1815(2016)014-0292-05
科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering
Vol. 16　No. 14　May. 2016
© 2016　Sci. Tech. Engrg.

基于经济效益分析的插电式混合动力汽车最佳纯电续驶里程研究

陈万吉[1]　李孟良[2]　梁晶晶[1]　杨红松[1]　陈昱光[3]
(中国汽车技术研究中心北京工作部[1],北京 100070;中国汽车技术研究中心汽车试验所[2],天津 300300;
昆明理工大学交通工程学院[3],昆明 650500)

摘　要　以插电式混合动力汽车行驶特性为研究对象,通过调查确定国内汽车日均行驶里程范围,经过实验测试寻找插电式混合动力汽车油耗规律,同时分析了插电式混合动力汽车相关成本费用预期。最后通过经济效益分析方法分析插电式混合动力汽车不同纯电续驶里程下的成本效益情况,确定了插电式混合动力汽车的纯电续驶里程最佳经济效益点。

关键词　交通运输　最佳纯电续驶里程　经济效益分析　插电式混合动力汽车　最佳效益点
中图法分类号　U469. 72;　　**文献标志码**　A

在能源动力系统转型背景下,世界各主要汽车国家均制定了积极的电气化转型战略方案,其中,插电式混合动力作为传统动力向电力驱动的有效过渡,得到中国、美国、日本等国的高度重视。中国在《节能与新能源汽车发展规划(2012—2020 年)》中明确将插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV),作为实现“纯电驱动”战略的重要组成部分[1],美国更是提出 2015 年普及插电式混合动力汽车 100 万辆的发展目标, 并推动落实电池、电机等发展目标[2]。其最终目的均是为了实现能源动力系统电气化,降低传统汽车高速增长的燃油消耗和污染物排放。

插电式混合动力汽车在工作过程中不可避免有发动机的参与,如何提升其使用过程中燃油经济性是国内外相关人员研究的热点,比如通过控制策略优化改善燃油经济性等[3,4],但插电式混合动力汽车不同于传统发动机汽车,由于电能的参与,其使用经济性改善并不仅限于燃油经济性能的提升,还与使用习惯和整体经济性密切相关[5]。

目前,影响插电式混合动力汽车推广和使用的主要因素是其纯电续驶里程。过短的纯电续驶里程将难以满足驾驶者的日常出行需求,而纯电续驶里程越长其相应的汽车生产成本会越大,导致汽车售价过高,同样会降低插电式混合动力汽车的吸引力。因此,有必要综合考虑居民出行距离特点、插电式混合动力汽车油耗特性以及其相关费用成本因素,寻找既满足大部分出行需求,同时又能降低汽车生产和使用成本的最佳经济效益点,为确定插电式混合动力汽车最佳纯电续驶里程提供依据。现通过对我国居民出行距离范围特点调查,结合插电式混合动力汽车油耗测试数据,以及动力系统改变带来的成本增加等因素,综合分析插电式混合动力汽车不同纯电续驶里程的成本效益,以确定插电式混合动力汽车最佳经济效益点的纯电续驶里程。

1　插电式混合动力汽车行驶特性分析

插电式混合动力汽车是指具有大容量动力电池组并且可以利用电网对其进行充电的混合动力汽车[6]。其最大的特点就是结合了混合动力驱动系统和纯电动驱动系统,可以大幅改善传统的燃油经济性和纯电续驶里程。以丰田 PRIUS 为例,插电式混合动力相比传统混合动力,电池搭载量由原先(第三代)的 1. 3 kW · h(镍氢)增加到 5. 2 kW · h(锰酸锂),从而使纯电续驶里程由原先的 2 km 增加到 17. 6 km,平均燃油经济性由 5. 72 L/100 km 提升至 3. 41 L/100 km[7]。

为研究不同纯电续驶里程的插电式混合动力汽车能耗特性,以技术成熟的普锐斯为代表,分别选取 14 辆 PHEV-N(纯电续驶里程约 22 km)、5 辆 PHEV-L(纯电续驶里程约 30 km)、1 辆 HEV 和 1 辆 Corolla 进行了实证实验。随行驶里程不同的油耗数据统计见表 1。通过数据记录发现,插电式混合动力汽车运行模式可以明显区分为两个阶段:电量消耗阶段(charge-depleting,

2015 年 12 月 31 日收到　　国家自然科学基金(61364019)资助
第一作者简介:陈万吉(1983—),男,山东人,中国汽车技术研究研究中心新能源汽车发展研究部副部长。研究方向:新能源汽车产业技术。E-mail:chenwanji@ catarc. ac. cn。

CD)和电量维持阶段(charge-sustaining, CS),并且不同纯电续驶里程的车辆,平均油耗随充电行驶里程变化呈现类似的规律(见图 1)。在各自的平均 CD 距离内油耗都很低,超过平均 CD 距离后,随着里程增加,油耗逐渐增加,增加的幅度也都是由急变缓。随着里程的增加,PHEV-N 和 PHEV-L 油耗水平越来越接近,趋近同一个极限值。并且,根据相关实证试验报告,在 CD 阶段的全年平均油耗在 0.8 L/100 km,在 CS 阶段全年平均油耗为 4.65 L/100 km[8]。

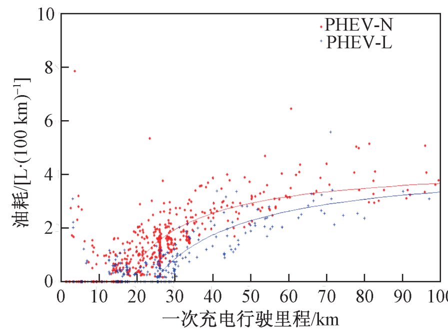

图 1　PHEV-N 和 PHEV-L 同时段行驶里程与油耗

Fig. 1　The mileage and fuel consumption comparison of PHEV-N and PHEV-L

表 1　行驶里程-油耗变化实验数据

Table 1　The experimental data of mileage- fuel

PHEV(20 km)				PHEV(28 km)			
行驶距离/km	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L	行驶距离/km	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L
0	0	0.00	0.80	0	0	0.00	0.00
2.5	0	0.02	0.80	2.5	0	0.02	0.80
7.5	0	0.06	0.80	7.5	0	0.06	0.80
15	0	0.12	0.80	15	0	0.12	0.80
25	5	0.43	1.72	25	0	0.20	0.80
35	15	0.90	2.56	35	7	0.63	1.79
45	25	1.36	3.02	45	17	1.09	2.43
55	35	1.83	3.32	55	27	1.56	2.83
65	45	2.29	3.52	65	37	2.02	3.11
75	55	2.76	3.67	75	47	2.49	3.32
85	65	3.22	3.79	85	57	2.95	3.47
95	75	3.69	3.88	95	67	3.42	3.60
105	85	4.15	3.95	105	77	3.88	3.70
115	95	4.62	4.01	115	87	4.35	3.78
125	105	5.08	4.06	125	97	4.81	3.85
135	115	5.55	4.11	135	107	5.28	3.91
145	125	6.01	4.15	145	117	5.74	3.96
155	135	6.48	4.18	155	127	6.21	4.00
165	145	6.94	4.21	165	137	6.67	4.04
175	155	7.41	4.23	175	147	7.14	4.08
185	165	7.87	4.25	185	157	7.60	4.11
195	175	8.34	4.27	195	167	8.07	4.14
205	185	8.80	4.29	205	177	8.53	4.16

2　插电式混合动力汽车销售价格与纯电续驶里程关系分析

相比传统汽车,插电式混合动力的成本增加主要有动力电池及相关附件的成本。对于动力电池成本的增加,美国环境保护署给出了不同纯电续驶里程下电池组生产成本的增加情况,如表 2 所示。通过对表中数据并进行回归分析,得到 2015 纯电续驶里程的关系式:

$$Y = 83.017X + 3\ 024 \quad (1)$$

式(1)中 X 为纯电续驶里程(km);Y 为综合生产成本上升额(MYM)。

表 2　大型乘用车电池包的生产成本以及千瓦时成本/美元[9]

Table 2　The direct manufacturing costs for battery pack and associated KWh costs (MYM)[9]

成本要素	2015	2018	2019	2020
REEV 20/ft.	569 6	364 5	291 6	192 6
REEV 40/ft.	836 8	535 6	535 6	428 5

除电池以外,插电式混合动力汽车与传统汽车的成本差异主要集中在电机、充电设备方面,通过比

较两类车的各项成本不难发现,每辆插电式混合动力汽车其他成本比传统汽车高出2 000美元[10]。同时考虑到当前汽车销售价格一般为成本价格的1.3倍,并综合各项成本增加,得到插电式混合动力汽车销售价格上升额与纯电续驶里程的关系式为

$$Y' = (83.017X + 3\ 024 + 2\ 000) \times 1.3 \quad (2)$$

式(2)中X为纯电续驶里程(km);Y'为综合成本(以销售价格计/MYM)上升额。

3　插电式混合动力经济效益分析

3.1　日均续驶里程调查

为全面了解中国消费者的日常出行习惯,以对插电式混合动力汽车经济效益进行分析,选取了国内新能源汽车产业比较活跃或潜在市场消费能力较强的北京、深圳、武汉、杭州、重庆、天津、上海、长春、合肥、济南10个城市,通过电话和网络调研,累计对6 000名消费者进行了问卷调查。结果显示,十城市被访者中,日均行驶里程大都集中在50 km以内,占调查者总量的80.9%。其中,行驶里程20 km以内的达43.7%,行驶里程30 km以内的达60.1%,行驶里程40 km以内的达69.6%。

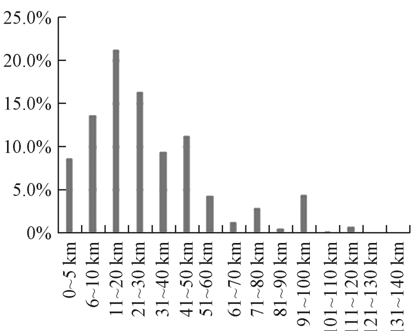

图2　十城市日均行驶里程分布调查

Fig. 2　The average daily mileage in ten cities

3.2　不同纯电续驶里程的插电式混合动力汽车油耗模拟情况

为了分析不同纯电续驶里程插电式混合动力汽车的经济性,在不可能有对应的车型,更不能通过实证实验统计得出的情况下,根据表1数据统计,并利用实证实验得出的不同纯电续驶里程车辆的平均油耗随纯电续驶里程变化具有的相似规律,我们对10 km、30 km、40 km、50 km、60 km纯电续驶里程车辆进行了油耗模拟。模拟计算公式为。

$$V_{\text{fuel}} = C_{\text{CD}}d; d < d_{\text{CD}} \quad (3)$$

$$V_{\text{fuel}} = (C_{\text{CD}}d_{\text{CD}} + (d - d_{\text{CD}}) + C_{\text{CS}})/100; d \geqslant d_{\text{CD}} \quad (4)$$

式中d为车辆实际行走里程;C_{CD}为CD模式的平均油耗,单位:L/100km;C_{CS}为CS模式的平均油耗,单位:L/100km;d_{CD}为CD模式行驶距离。油耗模拟结果如表3所示。

3.3　不同纯电续驶里程的插电式混合动力汽车成本效益分析

按日均续驶里程分布的频次进行处理,并与油耗模拟值对应,以计算相应的燃油消耗量。例如0~5 km续驶里程范围内有527个点,将527个点的日均里程近似为2.5 km,对应某一续驶里程车型的行驶里程2.5 km的油耗数值,并将三者相乘得到相应的燃油消耗数值。以此类推,可以得到某一续驶里程对应不同行走距离的燃油消耗,把所有行走距离的燃料消耗量进行累加,可以得到既定调查样本量下某一纯电续驶里程车型的燃油消耗总量。同样的方法,可以得到所有模拟车型既定调查样本容量下的燃油消耗总量。对应基本车型的燃油消耗总量,可以计算出不同纯电续驶里程插电式混合动力车型的燃油节省率。

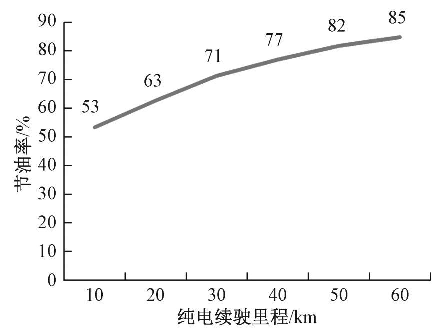

图3　不同续驶里程下的燃油节省率

Fig. 3　The Fuel savings rate of different EV

根据式(2),可以计算出不同纯电续驶里程下购买成本的增加,同时结合节油率,分析不同续驶里程车型的成本效益。为比较消费者购买不同纯电动续驶里程的PHEV的经济效益,引入"车型的成本效益"概念来评价单位售价上升额带来的节油效果。计算公式为

$$成本效益 = 1\ 000 \times 燃料节油率/售价上升额 \quad (5)$$

即每增加1 000美元,带来的燃油节省率。对应不同续驶里程,得到图4结果。在2015年的动力电池成本下,从使用层面的节油效益来看,插电式混合动力汽车的最佳纯电续驶里程为30 km,并且20~30 km之间效果差异不大。

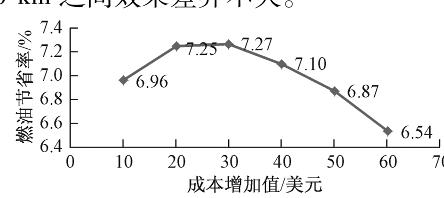

图4　每增加1 000美元对应的燃油节省率

Fig. 4　The fuel savings rate for each additional 1 000 Dollars

表 3　PHEV 油电混合模式下燃油消耗量模拟

Table 3　PHEV fuel consumption simulation in hybrid mode

行驶距离/km	PHEV(10 km)			PHEV(30 km)			PHEV(40 km)			PHEV(50 km)			PHEV(60 km)		
	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L	油电混合模式行驶里程/km	燃油消耗量/L	百公里油耗/L
0	0	0. 00	0. 80	0	0. 00	0. 80	0	0. 00	0. 80	0	0. 00	0. 80	0	0. 00	0. 80
2. 5	0	0. 02	0. 80	0	0. 02	0. 80	0	0. 02	0. 80	0	0. 02	0. 80	0	0. 02	0. 80
7. 5	0	0. 06	0. 80	0	0. 06	0. 80	0	0. 06	0. 80	0	0. 06	0. 80	0	0. 06	0. 80
15	5	0. 31	2. 08	0	0. 12	0. 80	0	0. 12	0. 80	0	0. 12	0. 80	0	0. 12	0. 80
25	15	0. 78	3. 11	0	0. 20	0. 80	0	0. 20	0. 80	0	0. 20	0. 80	0	0. 20	0. 80
35	25	1. 24	3. 55	5	0. 47	1. 35	0	0. 28	0. 80	0	0. 28	0. 80	0	0. 28	0. 80
45	35	1. 71	3. 79	15	0. 94	2. 08	5	0. 55	1. 23	0	0. 36	0. 80	0	0. 36	0. 80
55	45	2. 17	3. 95	25	1. 40	2. 55	15	1. 02	1. 85	5	0. 63	1. 15	0	0. 44	0. 80
65	55	2. 64	4. 06	35	1. 87	2. 87	25	1. 48	2. 28	15	1. 10	1. 69	5	0. 71	1. 10
75	65	3. 10	4. 14	45	2. 33	3. 11	35	1. 95	2. 60	25	1. 56	2. 08	15	1. 18	1. 57
85	75	3. 57	4. 20	55	2. 80	3. 29	45	2. 41	2. 84	35	2. 03	2. 39	25	1. 64	1. 93
95	85	4. 03	4. 24	65	3. 26	3. 43	55	2. 88	3. 03	45	2. 49	2. 62	35	2. 11	2. 22
105	95	4. 50	4. 28	75	3. 73	3. 55	65	3. 34	3. 18	55	2. 96	2. 82	45	2. 57	2. 45
115	105	4. 96	4. 32	85	4. 19	3. 65	75	3. 81	3. 31	65	3. 42	2. 98	55	3. 04	2. 64
125	115	5. 43	4. 34	95	4. 66	3. 73	85	4. 27	3. 42	75	3. 89	3. 11	65	3. 50	2. 80
135	125	5. 89	4. 36	105	5. 12	3. 79	95	4. 74	3. 51	85	4. 35	3. 22	75	3. 97	2. 94
145	135	6. 36	4. 38	115	5. 59	3. 85	105	5. 20	3. 59	95	4. 82	3. 32	85	4. 43	3. 06
155	145	6. 82	4. 40	125	6. 05	3. 90	115	5. 67	3. 66	105	5. 28	3. 41	95	4. 90	3. 16
165	155	7. 29	4. 42	135	6. 52	3. 95	125	6. 13	3. 72	115	5. 75	3. 48	105	5. 36	3. 25
175	165	7. 75	4. 43	145	6. 98	3. 99	135	6. 60	3. 77	125	6. 21	3. 55	115	5. 83	3. 33
185	175	8. 22	4. 44	155	7. 45	4. 03	145	7. 06	3. 82	135	6. 68	3. 61	125	6. 29	3. 40
195	185	8. 68	4. 45	165	7. 91	4. 06	155	7. 53	3. 86	145	7. 14	3. 66	135	6. 76	3. 47
205	195	9. 15	4. 46	175	8. 38	4. 09	165	7. 99	3. 90	155	7. 61	3. 71	145	7. 22	3. 52

同样地,可以计算出 2020、2025 年投入车辆的成本效益,如图 5 所示。从图 4、图 5 各续驶里程车型的成本效益可知,随各年度车型的纯电动续驶里程的增加,成本效益先是增加,在达到最大值后,呈下降趋势。由此可见,插电式混合动力汽车续驶里程存在一个成本效益最佳点或区间,而不是续驶里程越长越好。并且,随着电池成本的降低,最佳纯电续驶里程呈现增加趋势。

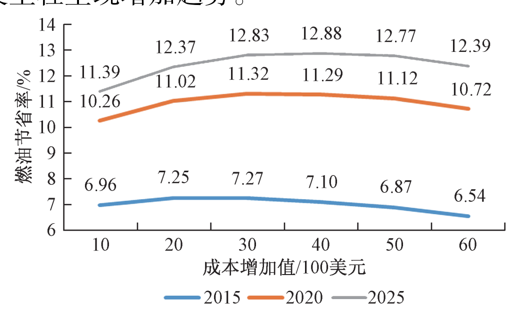

图 5　分年度投入车型每 1 000 美元增加带来的燃油节省率

Fig. 5　The fuel savings rate because per 1 000 dollars on different year models

4　总结

通过上述研究分析可以得出,插电式混合动力汽车纯电续驶里程的设定存在成本效益最佳区间或最佳点,并且跟电池成本和各国的出行特点有关,单独追求最大纯电续驶里程,从综合成本效益来讲,并不是最佳的选择。当前我国对插电式混合动力汽车享受补贴的纯电续驶里程下限为 50 km,更多的是考虑我国纯电驱动战略,目前设定的较高纯电续驶里程主要是考虑向“纯电驱动”方向的引导。但为了能够长远、可持续的大范围推广插电式混合动力汽车,必须考虑其经济效益的可行性。因此,本文的研究结果也可为政府和相关企业制定相应的发展政策和规划提供一定的理论依据。

参　考　文　献

1　国务院,节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年). http://www.gov.cn/zwgk/2012－07/09 /content_2179032.htm [2012-09-23]

The State Council, Saving and new energy automotive industry development plan (2012—2020). 2012-09-23

2　Epa, E V Everywhere. January, 2013

3　Delprat S. Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain. Proceedings of the American Control Conference, Arlington: VA June, 2001: 25—27

4　张冰战. 插电式混合动力电动汽车能量管理策略研究. 合肥:合

肥工业大学,2011
Zhang B Z. A study on energy management control strategy for plug-in hybrid electric vehicle. Hefei: Hefei University of Technology, 2011
5 侯 聪,王贺武,欧阳明高. 基于出行里程分布的 PHEV 平均燃油消耗计算方法. 汽车工程,2014;(12):1421—1427
Hou C, Wang H W, Ouyang M G. A methodology of calculating PHEV average fuel consumption based on the trip range distribution. Automotive Engineering,2014;(12):1421—1427
6 Lin C C, Peng H,Grizzle J W,*et al.* Power management strategy for parallel hybrid electric truck. IEEE Trans Control Syst Technol, 2003;11(6):839—849
7 阮娴静. 新能源汽车技术经济综合评价及其发展策略研究. 武汉:武汉理工大学,2010
Yuan X J. Comprehensive evaluation and development strategy of new energy vehicle technology economy. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010
8 李孟良. 丰田插电式混合动力电动汽车天津实证研究项目报告. 北京:中国汽车技术研究中心,2012
Li M L. Toyota plug-in hybrid electric cars in Tianjin empirical research project report. Beijing: China Automotive Technology and Research Center, 2012
9 Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards for Model Years 2017 - 2025. Office of Transportation and Air Quality, U S Environmental Protection Agency, 2012
10 Bandivadekar A. On the road in 2035: reducing transportation's petroleum consumption and GHG emissions. MIT Press, Laboratory for Energy and the Environment,MIT, 2008

Research on the Best EV Range of PHEV Based on Economic Benefit Analysis

CHEN Wan-ji[1], LI Meng-liang[2], LIANG Jing-jing[1], YANG Hong-song[1], CHEN Yu-guang[3]
(CATARC Beijing Operation[1], Beijing 100070,P. R. China; CATARC Automotive Test Center[2], Tianjin 300300,P. R. China; School of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology[3], Kunming 650500,P. R. China)

[**Abstract**] The driving characteristics of the plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) were investigated so as to determine the scope of the average daily mileage for domestic automobile through surveys and discover the rules of PHEV fuel consumption. Meanwhile, the expected costs and expenses related to PHEV were analyzed. Finally, the cost effectiveness of PHEV at different pure electric driving range were analyzed by the economic benefit analysis method, and the best economic benefit point for the pure EV range of PHEV was determined.
[**Key words**] transportation best EV range economic benefit analysis PHEV best benefit point