

纯电动公交车推广的综合效益与可行性分析

张景来 宫一清

(中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要 随着资源消耗及城市污染问题日益严重,电动汽车的发展受到了越来越多的关注,而纯电动公交车作为中国电动汽车推广的第一步,其在市场中的综合效益与可行性具有非常重要的研究价值。基于中国纯电动公交车的发展背景与现状,通过构建生命周期成本模型和燃料生命周期法评价其经济和能源环境效益。结果表明,纯电动公交车当前的生命周期成本仍不具备较强的市场竞争力,未来其能耗经济性将会显著提升;而中国高达78%的煤电比例极大降低了纯电动公交车的能源环境效益,这也是中国要真正实现节能减排而非污染转移需考虑的问题。对公交企业的动态模拟运营结果揭示,第1周期由于初期投资成本过高,第8年仍会亏损56.12万元;而基于市场激励机制的角度分析,实现盈亏平衡的最高票价价格为1.58元。因此,起步阶段政府补贴和政策扶持很有必要,但纯电动公交车在中国的成熟发展最终还是要通过政府和市场的协同激励来实现。

关键词 纯电动公交车 综合效益 成本—收益分析 盈亏平衡 可行性

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.11.019

Comprehensive benefits and feasibility analysis to popularize pure-electric buses ZHANG Jinglai, GONG Yiwei.
(School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872)

Abstract: As the problem of resource consumption and urban pollution is increasingly serious, the development of electric vehicles has attracted more and more attention. So as the first step of popularizing electric vehicles in China, the comprehensive benefits and feasibility analysis of pure-electric buses has significant research value. Based on the development background and current situation of the pure-electric bus in China, this study evaluated its economic, energy and environmental benefits through establishing life cycle cost model and fuel life cycle analysis. The results showed that the life cycle cost of the pure-electric bus still lacked market competitiveness and its energy efficiency would increase obviously in the future. The situation where the proportion of coal-generated electricity was high up to 78% in China greatly reduced its energy and environmental benefits. This was also a problem we must take into the consideration to achieve energy saving and emission reduction rather than pollution diversion. The findings of dynamic simulate operation revealed that because of the high initial investment cost in the first running cycle the enterprise would still lose 561 200 Yuan in the last year. What's more, the par value to achieve breakeven was 1.58 Yuan based on the market incentives. To sum up, it is necessary for government to provide subsidies and support in the early stage, while the maturational development of pure-electric buses in China eventually depends on the collaborative motivation of government and market.

Keywords: pure-electric bus; comprehensive benefits; cost-income analysis; breakeven; feasibility

《2013年中国机动车污染防治年报》显示,2012年我国机动车保有量已超过2.2亿辆,排放污染物4600万t,作为我国空气污染的重要来源,是造成雾霾、光化学烟雾污染的重要原因,机动车污染防治已迫在眉睫^[1-2]。我国《节能与新能源汽车发展规划(2012—2020年)》中明确规定将纯电动汽车作为我国新能源汽车的主要发展方向;科技部“863计划”电动汽车重大专项中选择新一代电动车辆技术作为我国汽车科技创新的主攻方向;《国家“十二五”电动汽车科技产业化重大专项项目》中预计用于纯电动

汽车研究和锂电池攻关的总投资在30亿元左右,由此可见,我国政府对纯电动汽车发展的重视程度^[3]。作为调整能源结构和应对环境问题的突破口,发展节能与新能源汽车备受重视,纯电动汽车经济效益和减排效益的研究正逐渐成为学术界和公众关注的热点问题^[4-6]。纯电动公交车作为公共设施,具有车速较低、线路固定及补贴较高等特点,是实现纯电动汽车在我国发展的第一步,其市场中推广的综合效益与可行性具有非常重要的研究价值。考虑到虽然纯电动公交车在运行过程中使用的是电能,但

第一作者:张景来,男,1961年生,博士,教授,研究方向为环境能源工程。

2012年我国煤电比例接近78%,评价过程中电能生产阶段的能耗和环境影响不能忽略,故需使用生命周期评价法实现从原材料的采集加工到运输、使用和后处理整个阶段的全面产品评价。美国能源部阿冈国家实验室曾开发了燃料生命周期评价模型^[7];刘宏等^[8]通过生命周期评价,得出我国应以超微电动汽车为产业化突破口的市场发展策略;吴添等^[9]则从消费者的视角出发,对生命周期成本的影响因素进行了探讨。但目前仍缺乏对纯电动公交车综合效益的全面评价。

此外,目前我国发展电动汽车产业主要依靠的还是政策扶持和经济补贴,这种低效率的激励方式显然不是长久之计^[10-11]。杨磊^[12]曾对影响纯电动汽车经济性的各部分传递效率进行了探讨;郑丹^[13]提出了利用夜间低谷时期为电动公交充电的有效方法;于飞等^[14]利用成本—收益法分析得出快换式纯电动公交车更具优势的结论。在成本—收益的问题上,目前的研究基本集中于公交企业静态价格下的成本核算,缺乏动态指数变化的模拟以及需求弹性波动的影响分析^[15-16]。鉴于此,本研究对纯电动公交车的经济、能源与环境综合效益进行了探究,并结合弹性分析及成本—收益比较对公交企业的运营状况进行动态模拟。由此总结出纯电动公交车在我国现阶段发展的价值及短板所在,为相关政策的制定提供参考。

1 模型建立及方法简介

1.1 生命周期成本模型的建立

生命周期成本是影响纯电动公交车能否真正走向市场的关键因素。基于购置成本和使用成本构建纯电动公交车的全生命周期成本模型,全生命周期成本(C ,万元)包括购置成本(C_A ,万元)、政府补贴(C_S ,万元)、能耗成本(C_Z ,万元)和维修保养成本(C_M ,万元)4个部分^[17]。以近年来在新能源领域发展较好的福田欧辉纯电动公交车作为参考车型,基于财政部和科技部联合发布的《节能与新能源汽车示范推广财政补助资金管理暂行办法》,充分考虑未来伴随技术进步和成本降低,政府补贴减少甚至取消的可能性,依据《机动车强制报废标准规定》按8年的折旧年限评价其使用成本。

为分析纯电动公交车全生命周期成本的优劣,采用与传统燃油公交车对比分析的方法。在相关指标的选取上,根据2006—2013年北京市电价及柴油价格对当前能耗成本进行评价,并利用最小二乘法

拟合出未来价格指数变化趋势,以对未来成本变化情况进行预测。

1.2 燃料生命周期法对能源、环境效益的评价

原油的勘探、开采、运输、炼化和成品油的运输,煤炭的开采、运输、热力发电、输变电和充电都需要消耗相当的能源并产生污染物^[18],因而采用燃料生命周期法对纯电动公交车和燃油公交车进行能源效益和环境效益的综合评价。考虑整个燃料生命周期内,燃油公交车的能源综合使用效率为柴油的加工、运输及车辆利用效率之积;纯电动公交车的能源综合使用效率则是煤炭加工、发电、输电、充电及车辆利用各部分效率之积^[19]。

以 W (kg)代表从油和电等能源的开采,到炼油、发电,再到油、电输送,最后到车辆运行整个过程中的总排放量。其中,从开采到输送的排放量为 W_1 (kg),车辆运行时的排放量为 W_2 (kg)。虽然纯电动公交车在城市运行过程中使用的是电能,不排放 CO_2 也不产生污染物,但我国高达78%的煤电比例极大影响了其燃料生命周期内的环境效益。通过燃油汽车尾气与燃煤电厂相关排放参数,对比测算燃油公交与纯电动公交车的 CO_2 、污染物减排效益。

1.3 成本—收益法动态模拟运营情况

对公交企业在相对理想情况下进行最小成本核算,引入车辆能耗经济性指标考虑能量的传递效率,并以此作为耗费总电能的重要部分;根据《低碳背景下电动汽车充换电站规划》,因公交车具有相对固定的运行时间和驾驶路线,且深夜对电池进行集中充电正值电力系统低峰时期,工业电价较低,假设其利用电池租赁及低谷电价下的充换模式进行运营。将一系列可变成本和固定成本纳入核算体系,以动态的价格观对电费、薪酬工资和维修费用等做出拟合和修正。

在政府不提供任何补贴的情况下,通过北京纯电动公交车的实际运营及成本核算情况,观察其折旧年限期间在市场中的自由发展情形。在当前雾霾天气已经对我国城市环境和居民生活造成巨大威胁的情况下,基于显性消费需求进行弹性分析,以使收益端获得最大化。需求价格弹性表示在一定时期内商品的需求量变动对于该商品价格变动的反应程度,当分析公交客运量对票价的反应程度时,因票价在一定范围内波动,根据需求价格弧弹性公式有:

$$\epsilon = - \frac{\frac{D' - D}{D' + D}}{\frac{p' - p}{p' + p}} \quad (1)$$

式中： ϵ 为公交需求弹性系数； D' 为预测公交客运量； D 为当前公交客运量； p' 为预测的公交票价，元； p 为当前公交票价，元。

若 d_i' 为第 i 年的纯电动公交预测客运量，则总收入 (I , 元) 有：

$$I = p' \sum_{i=1}^8 d_i' \quad (2)$$

当 p' 取值使得 8 年的运营总成本与总收入相等时，即为盈亏平衡点，通过消除学生票、公交卡出行等价格歧视影响，得到最终能实现盈亏平衡的票面定价。进而结合动态模拟运营情况及盈亏平衡价格，分析纯电动公交车在我国推广的可行性，并为政府扶持及市场激励政策的制定提供一定参考依据。

2 结果分析与讨论

2.1 生命周期评价经济效益分析

对燃油公交车和纯电动公交车进行生命周期成本对比评价，结果见图 1。燃油公交车 C 为 210 万元，而纯电动公交车 C 为 280 万元。虽然政府补贴使纯电动公交车成本有所降低，但相比前者仍旧昂贵；纯电动公交车使用的锂离子电池寿命短、成本高，使其 C_M 大大增加；能耗成本是纯电动公交车发展的优势，尤其是随着原油的紧缺，其能耗经济性将在未来越发凸显。综合来看，现阶段纯电动公交车 C 远高于燃油公交车，推广存在一定阻碍。

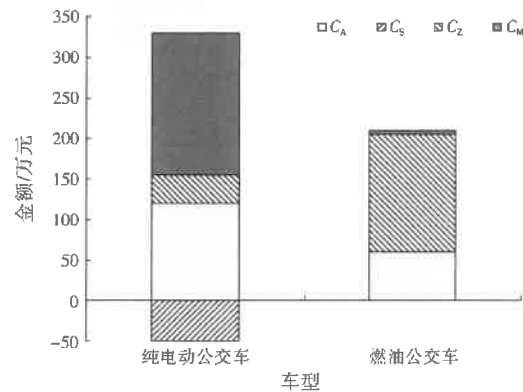


图 1 燃油公交车与纯电动公交车生命周期成本对比
Fig.1 Life cycle cost of fuel buses and pure-electric buses

乐观估计，按最小二乘法拟合出的未来价格指数，8 年后油价为 17 元/L，电价为 0.9 元/(kW·h)，政府不再提供补贴，购置成本下降 40%，动力电池成本下降 60%，则燃油公交车 C 为 301 万元，纯电动公交车 C 为 185 万元；保守估计，油价、电价均年均上涨 5%，政府不再提供补贴，购置成本下降 20%，动力电池成本下降 40%，则燃油公

车 C 为 260 万元，纯电动公交车 C 为 256 万元。

以上结果表明，随其能耗经济性和环境效益的突出，纯电动公交车未来的市场竞争力将会越来越强。

2.2 能源与环境效益分析

燃油公交车每百公里燃烧 35 L 柴油，其中蕴含化学能 1.27×10^9 J，最终转化为 5.08×10^8 J 机械能。根据德国电动汽车研究所的数据显示，因纯电动公交车在交通堵塞时发动机不需要怠速运转，其电能的车辆利用效率可达 78%，而燃油公交车则由于在市内行驶时频繁的停车和低速行驶，能量利用效率仅为 30% 左右^[20-21]。将燃料生产与运输环节的能耗计算在内，考虑到我国火力发电比例居高不下的现状，若仅按煤炭发电效率核算，则燃油公交车与纯电动公交车的能源综合使用效率见表 1。燃油公交车和纯电动公交车燃料生命周期 CO_2 排放情况见表 2。我国煤炭平均硫分为 1.74%（质量分数），目前在我国广泛应用的湿式石灰石-石膏法烟气脱硫技术基本可使脱硫率达 90% 以上，“十二五”期间我国再次新增烟气脱硝费用，预计至 2015 年脱硝率将达 85%，而根据国电环境保护研究院的调研结果显示，燃煤电厂对 PM_{10} 的平均去除率为 99.29%，对 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均去除率为 97.41%^[22-23]，结合我国汽车技术研究中心对北京施行的国家第 V 阶段柴油使用标准进行测算，燃油公交车与纯电动公交车污染物排放量见表 3。

表 1 燃油公交车和纯电动公交车能源综合使用效率

Table 1 The comprehensive energy efficiency of fuel buses and pure-electric buses %

效率	燃油公交车	纯电动公交车
燃料加工效率	85	95
发电效率		36
运输效率	95	94
充电效率		82
车辆利用效率	30	78
能源综合使用效率	24.23	20.56

表 2 燃油公交车和纯电动公交车燃料生命周期 CO_2 排放情况

Table 2 The CO_2 emissions of fuel buses and pure-electric buses in fuel life cycle

项目	燃油公交车	纯电动公交车
每百公里城市能耗	35 L 柴油	100 kW·h 电能
W_1	CO_2 排放率	0.579 kg/L
	每百公里 CO_2 排放量/kg	20.27
W_2	CO_2 排放率	2.677 kg/L
	每百公里 CO_2 排放量/kg	93.70
W	CO_2 减排率/%	0
	每百公里 CO_2 排放量/kg	113.97

表 3 燃油公交车与纯电动公交车污染物排放量
Table 3 Pollutant emissions of fuel buses and electric buses g/km

项目		SO ₂	NO _x	PM
燃油公交车	W ₁	1.79	1.22	0.001
	W ₂	1.99	1.63	0.024
	W	3.78	2.85	0.025
纯电动公交车	W ₁	1.58	0.97	0.013
	W ₂	0	0	0
	W	1.58	0.97	0.013

结果表明,若电能全部来自于煤炭发电,则纯电动公交车整个燃料生命周期内的能源综合使用效率仅为 20.56%,并不及燃油公交车,但考虑到我国现阶段原油进口量大、对外依赖度高的现状,纯电动公交车的石油替代效益仍旧明显。纯电动公交车在城市运行过程中虽然可以实现 CO₂ 和污染物的零排放,有效缓解城市中心的污染状况,但我国高达 78% 的煤电比例使其 CO₂ 减排率仅为 25.4%;污染物减排率相对明显,主要污染物 SO₂、NO_x 及 PM 减排率分别为 58.20%、65.96% 和 48.00%。若要进一步提高 CO₂ 和污染物减排率,仅仅依靠推广纯电动公交车是不够的,根本上还是要增加可再生能源在我国的发电比例。

2.3 模拟运营及弹性分析结果

综合考虑能量传递效率、低谷充换模式、职工薪酬及维护费用等对使用成本、客运量、运营车辆数等变化造成的收益端影响,排除社会、政府的积极需求和正面宣传效应,以动态的视角对 8 年内纯电动公交企业的运营情况进行成本—效益分析。结果表明,累计客运收入曲线比累计成本曲线变化趋势大,见图 2;但由于初期投资成本过高,第 8 年仍会亏损 56.12 万元,见表 4。在进入下一轮新周期的运营后,理论上,随着社会的发展和科技的进步,再次购置成本相对于前一个周期会有明显的下降,因此有可能实现盈利。但对于公交企业而言,初期运营亏

损过大的压力若无政府补贴资助和政策倾向性扶持仍难以克服。基于市场激励机制的角度,以对数回归法计算出的有轨交通时期地面公交需求弹性系数 -0.519 作为参考,得到公交企业实现盈亏平衡的最高票面价格为 1.58 元,故可以考虑采用多种方式提高民众对纯电动公交车的认知度和认可度,在起步阶段适当提高票价,从而利用市场中的显性消费需求,更有效率地实现纯电动公交车的推广。

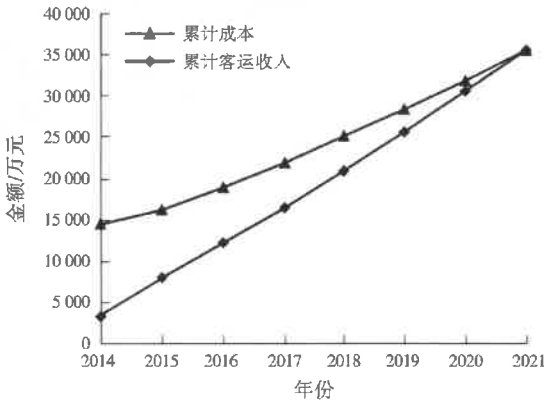


图 2 2014—2021 年公交企业累计收支情况
Fig.2 The accumulative income and expenses of an pure-electric bus company in 2014-2021

3 结语与建议

本研究基于现阶段我国纯电动公交车的发展背景和现状,对其综合效益与可行性进行了相关分析。总体而言,研究结论在实践层面对政府和企业具有

表 4 2014—2021 年纯电动公交企业模拟运营情况
Table 4 The operation simulation situation of an pure-electric bus company in 2014-2021 万元

年份	累计成本	年运营成本	客运收入	盈亏	累计盈亏
2014	14 349.93	14 349.93	3 854	-10 495.93	-10 495.93
2015	16 135.03	1 785.10	4 024	2 238.90	-8 257.03
2016	18 889.84	2 754.81	4 194	1 439.19	-6 817.84
2017	21 840.17	2 950.33	4 364	1 413.67	-5 404.17
2018	24 988.78	3 148.61	4 535	1 386.39	-4 017.78
2019	28 338.46	3 349.68	4 705	1 355.32	-2 662.46
2020	31 891.98	3 553.52	4 875	1 321.48	-1 340.98
2021	35 652.12	3 760.14	5 045	1 284.86	-56.12

如下启示和建议:

(1) 纯电动公交车现阶段发展的一大制约因素还是成本问题,而成本的降低依赖于技术的进步,政府除了考虑在电池领域加大研究力度还应力求实现各厂商之间技术标准和产品通用性的一致,以实现规模经济和最大程度上的资源共享。结果表明,起步阶段政府支持必不可少,而政府在采取补贴、建设充电桩等措施的同时,也要在道德、行政和法律方面加以约束,为纯电动公交车的推广提供良好的背景条件。

(2) 可以看到,虽然纯电动公交车起到了较好的石油替代效益,并且电能作为二次能源具有多种来源途径,但我国过高的煤电比例导致其能源环境效益并未得以充分发挥。纯电动公交车并非人们想象当中的“零排放”,其现阶段可以在一定程度上帮助缓解北京等城市的中心污染严重、雾霾频繁等问题,但要真正实现节能减排而非简单的污染转移,从根本调整能源结构非常必要。

(3) 纯电动公交车的推广不能仅依赖于政府补贴这样一种既会给政府造成过重负担也容易使企业产生依赖性的低效激励方式,其成熟发展最终还是要靠企业的积极参与和消费者的认可支持。故推广过程中在考虑政府的资金投入、科研力度、政策优惠和配套设施建设的同时,还要加大宣传力度,加快转变消费者的消费观念和态度,提高民众的支持力度,采取合适的市场激励机制,最终在政府和市场的协同激励下实现我国纯电动公交车的良性发展。

参考文献:

- [1] 王自发,吴其重.区域空气质量模式与我国大气污染控制[J].科学对社会的影响,2009(3):24-29.
- [2] 朱成章.对我国发展纯电动汽车的质疑与思考[J].中外能源,2010(9):11-15.
- [3] 张文亮,武斌,李武峰.我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J].电网技术,2009(2):1-5.
- [4] 李美霞.基于消费者视角的纯电动汽车购买决策影响因素及市场化研究[D].上海:华东理工大学,2013.
- [5] 杜瑞.纯电动汽车起步控制策略研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [6] CHAU K T, WONG Y S. Overview of power management in hybrid electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(15): 1953-1968.
- [7] 方景瑞.新能源汽车能源及环境效益的分析研究与评价[D].长春:吉林大学,2009.
- [8] 刘宏,王贺武,罗茜,等.纯电动汽车生命周期 3E 评价及微型化发展[J].交通科技与经济,2007(6):45-48.
- [9] 吴添,欧训民,林成涛.从消费者的视角分析纯电动城市客车的生命周期成本[J].汽车工程,2012,34(12):1150-1154.
- [10] 李永钧.中国电动汽车直面“成长烦恼”[J].汽车工业研究,2010(11):57-60.
- [11] HARDING G G. Electric vehicles in the next millennium[J]. Journal of Power Sources, 1999, 78(1): 193-198.
- [12] 杨磊.纯电动汽车能耗经济性分析[J].上海汽车,2007(8):11-13.
- [13] 郑丹.基于发电的低励限制以及磁力消失计算的配合探讨[J].中国新技术新产品,2013(10):115-116.
- [14] 于飞,张可银.纯电动公交车在青岛的运营及对比分析[J].人民公交,2013(7):49-51.
- [15] 梁晓亮.上海纯电动公交车的“运营帐”[N].经济日报,2009-05-12(12).
- [16] 郑雪青.我国新能源汽车企业战略成本管理应用研究[D].重庆:重庆理工大学,2009.
- [17] 唐葆君,刘江鹏.我国纯电动与混合动力公交车发展的经济性分析[J].中国能源,2013,35(8):37-47.
- [18] CAMPANARI S, MANZOLINI G, DE LA IGLESIA F G. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations[J]. Journal of Power Sources, 2009, 186(2): 464-477.
- [19] 苏利阳,王毅.未来中国纯电动汽车的节能减排效益分析[J].气候变化研究进展,2013(7):284-290.
- [20] AMJAD S, NEELAKRISHNAN 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): 1104-1110.
- [21] 魏哲林.电动汽车的环境效益评估[J].电力与能源,2013(6):231-238.
- [22] 王圣,朱法华,王慧敏.基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究[J].环境科学学报,2011,31(3):630-635.
- [23] 白连勇.中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J].科技创新与应用,2013(6):127-128.

编辑:贺锋萍 (收稿日期:2015-02-07)