

燃料电池公交车电源配置生命周期评价优化

朱 昊, 余卓平

(同济大学 汽车学院, 上海 200092)

摘要: 在设计燃料电池公交车电源配置方案时, 普遍只考虑行驶过程中的动力性和燃料经济性, 忽略了车辆其余各阶段对设计方案的影响, 针对这一情况, 基于生命周期评价理论, 分析了燃料电池公交车全生命周期内各阶段的能耗与排放, 建立了其生命周期评价模型. 在中国典型城市公交循环工况下, 通过生命周期评价模型分析得出, 在一定的条件下燃料电池公交车的电源配置存在最优解, 并利用遗传算法得到最优电源配置方案. 对于所分析的样车, 在最优电源配置下其生命周期能耗与排放比纯电动公交车分别降低了 24.86% 和 25.76%, 比使用大功率燃料电池系统的燃料电池公交车分别降低了 12.11% 和 6.51%.

关键词: 燃料电池公交车; 生命周期评价; 电源配置; 遗传算法

中图分类号: U469.13

文献标志码: A

Optimal Configuration of Power Source for the Fuel Cell Bus Based on Life-cycle Energy Consumption and Emissions

ZHU Hao, YU Zhuoping

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: When designing the power source configuration of fuel cell bus, only the power and fuel economy during the driving process were considered, and the impact of the other stages of the vehicle was ignored. In view of this situation, the energy consumption and emissions of fuel cell bus in all life cycle stages were analyzed based on the LCA (Life Cycle Assessment) theory, and a LCA model of fuel cell bus was established. By analyzing the life cycle energy consumption and emissions with Chinese urban bus driving cycle, the results showed that the power source configuration of fuel cell bus could be optimized. The optimal scheme of power source configuration was obtained by using genetic algorithm. The life cycle energy consumption and emissions of the fuel cell bus with optimal power source configuration were lower than

those of the battery electric bus by, respectively, 24.86% and 25.76%, and were lower than those of the fuel cell bus with high-power fuel cell system by 12.11% and 6.51%, respectively.

Key words: fuel cell bus; life cycle assessment; power source configuration; genetic algorithm

在市场的强烈拉动和各级政府的大力推动下, 我国新能源客车产销量增长迅猛, 2017 年新能源公交车的销量超过 7.6 万辆^[1]. 作为新能源公交车未来重要的发展方向之一, 燃料电池公交车已在世界上越来越多的城市中进行了示范运营和推广.

燃料电池公交车的电源系统, 目前主流的设计方案是采用燃料电池系统与动力电池组配置在一起组成“电-电”混合配置方案. 若将燃料电池发动机额定功率与车载电源系统峰值总功率的比值定义为电源分配系数, 用 β 表示. 当 $\beta=0$ 时, 即燃料电池发动机功率为零, 表示车辆为纯电动公交车; 当 $\beta=1$ 时, 表示车辆为纯燃料电池公交车; 当 $0<\beta<1$ 时, 表示车辆为“电-电”混合的燃料电池公交车. 但是 β 值该如何选取目前还没有统一的设计方案. 国内外不少学者对燃料电池汽车的电源配置进行了分析研究. 文献[2-3]依据已有的性能指标, 对燃料电池汽车进行了动力系统匹配. 文献[4]考虑了燃料经济性和使用成本对电源配置的影响, 对燃料电池汽车的电源分别进行了匹配. 文献[5-8]基于行驶工况的功率需求和能量需求对燃料电池汽车的电源配置进行了分析. 可见, 目前国内外已有的相关研究仅考虑了车辆行驶过程中的动力性和燃料经济性, 没有考虑车用燃料生产、车辆及零部件生产、维护等阶段过程中的能耗和排放问题. 这些阶段过程中的能耗与排放也会直接影响到燃料电池公交车的节能减排效果, 因此需要从全生命周期角度对燃料电池公交车电源

收稿日期: 2018-07-05

第一作者: 朱 昊(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为新能源汽车生命周期评价. E-mail: 2011zhuhao@tongji.edu.cn

通信作者: 余卓平(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为车辆工程. E-mail: yuzhuoping@tongji.edu.cn

配置方案进行深入分析和优化。

本文基于生命周期评价方法 (life cycle assessment, LCA), 计算分析燃料电池公交车生命周期内各个阶段的能耗和排放, 并采用遗传算法计算求解在能耗最低和排放最少目标下的燃料电池公交车最优电源配置方案。

1 燃料电池公交车 LCA 模型建立

汽车的生命周期评价涵盖 2 个部分, 一是燃料周期, 也被称为油井到车轮周期 (well to wheel, WTW), 包括了车用燃料生产阶段和车辆行驶阶段; 二是车辆周期, 包括了关键零部件及车身主体的生产装配、运输分配、维护保养和回收报废等阶段。2 个周期内的能耗与排放共同构成了汽车生命周期内的总能耗和对环境的综合影响量。

在分析燃料电池公交车生命周期各阶段时, 只考虑与研究对象直接相关的环境影响, 而间接相关的环境影响 (例如工厂建设、基础设施建设、机器设备制造等) 则不在本文的研究范围内。燃料电池公交车生命周期系统边界如图 1 所示。

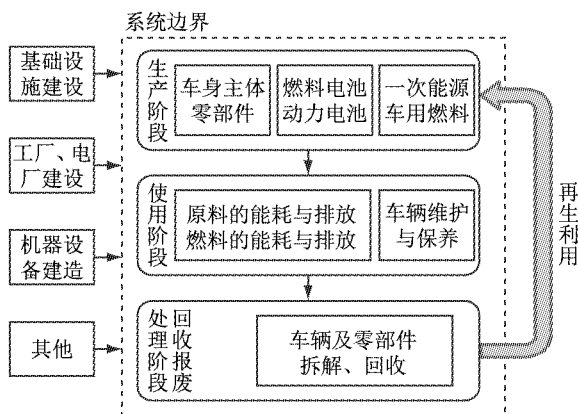


图 1 燃料电池公交车生命周期系统边界

Fig.1 System boundary for life cycle analysis of fuel cell bus

研究过程以车辆在道路上行驶 1 km 作为评价的功能单位, 以车辆行驶 1 km 的能源消耗 ($\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}$)、温室气体排放和常规气体污染物排放 ($\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$) 这三方面作为研究燃料电池公交车生命周期内的能耗和对环境影响的评价指标。

1.1 燃料周期

燃料周期又可细分为 2 个阶段, 一是车用燃料生产阶段, 即油井到油泵 (well to pump, WTP) 阶段, 包括了一次能源生产、运输和存储、车用燃料的生产、运输、存储和加注; 二是车辆行驶阶段, 即油泵到车轮 (pump to wheel, PTW) 阶段, 该阶段主要表

现为车辆行驶过程中的能量转换。

1.1.1 WTP 阶段

燃料电池公交车所涉及的车用燃料主要为电能和氢气。在计算电能生产的生命周期能耗和排放时, 以 2015 年国家电力结构为基准, 当年全国发电量为 58 145.7 亿千瓦时, 其中火电占 73.68%、水电占 19.44%、核电占 2.94%、风电占 3.19%。输配电损失率为 5.14%^[9]。在计算氢气生产的生命周期能耗和排放时, 采用的制氢方式为利用工业副产物富氢气体通过变压吸附工艺来获得氢气^[10], 制氢效率为 70%^[11]。工厂生产出的氢气通过长管拖车运送到加氢站, 模型中运输距离按 100 km 计算, 压缩机的压缩效率为 92.5%^[12]。其他一次能源 (煤炭、石油、天然气) 的开采、加工、运输和车用燃料 (汽油、柴油) 的生产、运输等数据均来源于国家统计局、国家交通运输部发布的相关数据以及文献^[13]。

1.1.2 PTW 阶段

燃料电池公交车在行驶过程中排放的温室气体和常规气体污染物为零, 而行驶过程中电能与氢气的消耗量则需要根据电源配置仿真计算得到。

1.2 车辆周期

车辆周期包含车身主体生产、车载电池的生产、车用流体生产、车辆装配、车辆维护和车辆报废 6 个阶段。

1.2.1 车身主体生产

在评价车身主体生产过程中的能耗和排放时, 考虑的原材料包括钢、铁、铝、铜、镁、塑料、橡胶、玻璃和油漆等。各主要原材料生产过程中的能耗和排放数据来自于 GREET 软件数据库, 但考虑到我国在钢铁和铝的生产工艺上与美国有较大差距, 能耗比美国高 60%^[14], 所以在 GREET 软件数据的基础上重新进行了计算调整。

1.2.2 车载电池生产

在评价中涉及的车载电池包括启动电池 (12 V 铅酸电池)、动力电池 (锂离子电池) 和燃料电池。3 种电池的主要原材料及其生产过程中的能耗和排放数据来自于文献^[15-16]和 GREET 软件数据库。假设 3 种电池装配时的能耗强度相同, 均为 $2.67 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且工艺燃料均为电能^[17]。

1.2.3 车用流体生产

在评价车用流体生产过程中的能耗和排放时, 主要考虑了制动液、变速箱液、冷却液、雨刷液和车用添加剂。各类车用流体的生产过程能耗和排放数据来自于文献^[18]和 GREET 软件数据库。

1.2.4 车辆装配

针对城市公交车辆在整车厂内装配过程中产生

的能耗和排放,主要考虑车身油漆生产、油漆喷涂、车身焊接、零部件装配、物料输配和车间供暖照明等过程.相关数据来自于文献[19]和 GREET 软件数据库.

1.2.5 车辆维护

按照《机动车强制报废标准规定》^[20],假设燃料电池公交车的行驶寿命为 40 万 km. 根据国家标准《汽车维修、检测、诊断技术规范》^[21],假设每 1.5 万 km 更换一次变速箱液和雨刷液,每 5 万 km 更换一次制动液、冷却液和轮胎.同时,考虑到我国目前纯电动公交车的实际运营情况,结合文献[22],假设在燃料电池公交车的行驶寿命内燃料电池需更换 1 次、动力电池需更换 2 次、启动电池需更换 3 次.

1.2.6 车辆报废

车辆报废包括车身拆解和车载电池报废 2 个过程.车身拆解的单位能耗为 $0.55 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22].假设 3 种电池的报废单位能耗相同,均为 $31 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23].

在以上对燃料电池公交车各阶段的分析基础上,建立全生命周期能耗与排放的评价模型,如公式(1)~(4)所示:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{fc(h)}} + E_{\text{fc(e)}} + E_{\text{vc}} \quad (1)$$

$$E_{\text{fc(h)}} = E_{\text{wtp(h)}} + E_{\text{ptw(h)}} \quad (2)$$

$$E_{\text{fc(e)}} = E_{\text{wtp(e)}} + E_{\text{ptw(e)}} \quad (3)$$

$$E_{\text{vc}} = \sum_{i=1}^6 E_{\text{vi}} \quad (4)$$

式中: E_{total} 为燃料电池公交车全生命周期能耗与排放; $E_{\text{fc(h)}}$ 和 $E_{\text{fc(e)}}$ 分别为氢气和电能在燃料周期的能耗与排放; E_{vc} 为燃料电池公交车在车辆周期的能耗与排放; $E_{\text{wtp(h)}}$ 和 $E_{\text{wtp(e)}}$ 分别为氢气和电能在 WTP 阶段的能耗与排放; $E_{\text{ptw(h)}}$ 和 $E_{\text{ptw(e)}}$ 分别为氢气和电能在 PTW 阶段的能耗与排放; E_{vi} 为第 i 个车辆周期各阶段的能耗与排放,其中下标 1 为车身主体生产、2 为车载电池生产、3 为车用流体生产、4 为车辆装配、5 为车辆维护、6 为车辆报废.

2 不同电源配置下的燃料电池公交车 LCA 分析

以整车整备质量为 10 800 kg 的 12 m 城市公交车为例,选取了 3 种不同的电源配置方案来分析燃料电池公交车生命周期能耗与排放.分析中以中国典型城市公交循环工况作为燃料电池公交车的目标运行工况,该工况的最大驱动功率需求为 157.6 kW,平均驱动功率需求为 30.4 kW.假设有 20%^[24]的制动能量被成功回收,车辆每日行驶 250 km,则

总能量需求为 230 kWh.选取的 3 种电源配置方案分别为:方案 1,燃料电池系统功率为零,即纯电动公交车($\beta=0$)方案;方案 2,小功率燃料电池系统搭配中等容量动力电池组($\beta \approx 0.33$)方案;方案 3,大功率燃料电池系统搭配小容量动力电池组($\beta \approx 1.00$)方案.3 种方案的电源配置情况见表 1.

表 1 燃料电池公交车 3 种电源配置方案
Tab.1 Three power source configuration schemes of fuel cell bus

方案	β	燃料电池系统功率/kW	动力电池组容量/kWh
1	0	0	300
2	0.33	50	100
3	1.00	135	20

假设不同电源配置的燃料电池公交车除了电源系统外,其他例如车身质量、电机质量和车用流体质量等均相同.动力电池的比能量为 $115 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25],燃料电池系统的比功率为 $400 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25],因此整车整备质量的计算如式(5)所示.

$$m_v = m_b + \frac{1\,000 \times E_{\text{bat}}}{115} + \frac{1\,000 \times P_{\text{fc}}}{400} \quad (5)$$

式中: m_v 为整车整备质量,kg; m_b 为除电源系统外的整车质量,kg; E_{bat} 为动力电池组的能量,kWh; P_{fc} 为燃料电池系统额定功率,kW.

3 种电源配置方案的燃料电池公交车生命周期能耗和排放的计算结果如图 2、图 3 和图 4 所示.

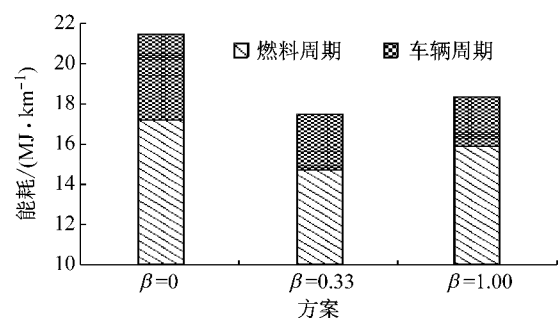


图 2 3 种电源配置方案的生命周期能耗

Fig.2 Life cycle energy consumption for three schemes of power source configuration

从图 2 和图 3 中可以发现,采用方案 2 的燃料电池公交车,其生命周期能耗和生命周期温室气体排放量在 3 种电源配置方案中都是最低,分别为 $17.45 \text{ MJ} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $1\,465.61 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$.方案 1 的生命周期能耗和温室气体排放量在 3 种电源配置方案中最高,分别达到 $21.44 \text{ MJ} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $1\,915.81 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$.同时可以发现,燃料周期的能耗在全生命周期的能耗中比重占到 80% 以上.

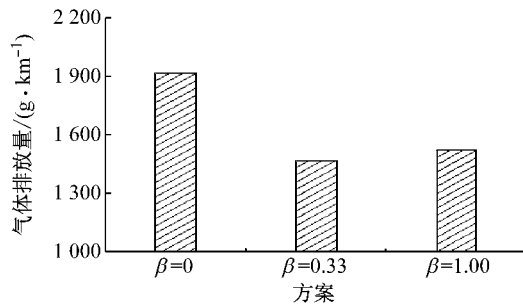


图 3 3 种电源配置方案的生命周期温室气体排放

Fig. 3 Life cycle greenhouse gas emissions for three schemes of power source configuration

从图 4 可见,方案 2 在常规气体污染物排放量上略微高于方案 3 的电源配置方案,主要是因为方案 2 在行驶过程中电能消耗较高,基于中国电力结构中火电比重大,因此在硫化物的排放量上较大。

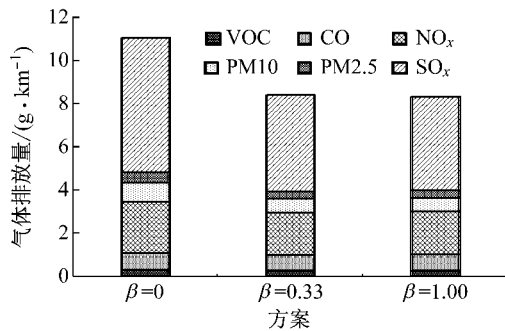


图 4 3 种电源配置方案的生命周期常规气体污染物排放

Fig. 4 Life cycle conventional gas pollutant emissions for three schemes of power source configuration

从 3 种电源配置方案的生命周期能耗和排放结果的变化趋势上可以看出,在 $0 < \beta < 1$ 的范围内,存在最优电源配置方案,且该方案的生命周期能耗最低、排放最少。

3 燃料电池公交车电源配置优化

采用遗传算法,以燃料电池公交车全生命周期内能耗最低和排放最少为优化目标,来计算求解燃料电池公交车的最优电源配置方案。

在 Matlab/Simulink 软件中建立遗传算法优化模型. 设定的遗传算法约束条件有 3 个,分别是①燃料电池系统额定功率选取范围为 10 kW~150 kW; ②动力电池组的能量选取范围为 10 kWh~200 kWh; ③燃料电池系统功率与动力电池组功率之和满足工况最大功率需求。

设定了 2 个车辆行驶场景,分别是车辆空载且空调关闭、车辆满载且空调开启,优化计算结果见

表 2。

由表 2 可以发现,在 2 个优化目标下得到的优化计算结果非常接近,主要是因为电能和氢气生产路径较为单一,且能耗和排放本身就具有一定的关联性. 因此,最终选取燃料电池系统功率 71 kW 搭配 43 kWh 的动力电池组作为燃料电池公交车的最优电源配置方案,在最优配置方案下 $\beta=0.62$ 。

表 2 燃料电池公交车电源配置优化结果

Tab. 2 Results of power source configuration optimization

行驶场景	能耗最小		排放最小	
	燃料电池功率/kW	动力电池容量/kWh	燃料电池功率/kW	动力电池容量/kWh
空载且空调关闭	70	43	68	45
满载且空调开启	72	42	70	44

通过燃料电池公交车 LCA 模型计算,最优电源配置方案的燃料电池公交车生命周期能耗为 $16.11 \text{ MJ} \cdot \text{km}^{-1}$,比方案 1 降低了 24.86%,比方案 3 降低了 12.11%;生命周期温室气体排放量为 $1422.33 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,比方案 1 降低了 25.76%,比方案 3 降低了 6.51%。

4 结论

基于生命周期能耗与排放,对不同电源配置的燃料电池公交车进行评价分析,并通过遗传算法优化得到最优电源配置方案,结论如下:

(1) 燃料周期在全生命周期中的比重超过 80%,电能和氢气的生产方式、生产工艺及生产过程中的能耗和排放对燃料电池公交车电源配置的选取有较大影响。

(2) 根据工况功率需求得到的燃料电池公交车电源配置方案并不是最优,通过生命周期分析发现在 $0 < \beta < 1$ 内存在最优电源配置方案。

(3) 利用遗传算法得到在中国典型城市公交循环工况下的最优电源配置方案为,燃料电池系统 71 kW 搭配 43 kWh 的动力电池组,此时 $\beta=0.62$ 。

(4) 最优电源配置方案的燃料电池公交车生命周期能耗和排放比纯电动公交车分别降低了 24.86% 和 25.76%,比大功率燃料电池系统方案的燃料电池公交车分别降低了 12.11% 和 6.51%。

参考文献:

[1] 中国汽车工业协会. 2017 年汽车工业经济运行情况 [EB/

- OL]. [2018-07-03]. <http://www.auto-stats.org.cn/ReadArticle.asp?NewsID=10030>.
- China Automotive Industry Association. Economic performance of the automobile industry in 2017 [EB/OL]. [2018-07-03]. <http://www.auto-stats.org.cn/ReadArticle.asp?NewsID=10030>.
- [2] 杜微微,赵昌锋. 燃料电池客车动力系统的匹配研究[J]. 客车技术与研究,2018,1(1):1.
DU Weiwei, ZHAO Changfeng. Research on matching of power system of fuel cell bus [J]. *Bus & Coach Technology and Research*, 2018, 1(1): 1.
- [3] 俞海涛,万钢,孙泽昌. 燃料电池汽车动力总成结构配置及参数优化匹配[J]. 汽车工程,2006,28(8):729.
YUN Haitao, WAN Gang, SUN Zechang. Study on configuration and parameters optimization of drive-train for fuel cell vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28(8): 729.
- [4] ZHENG C H, XU G Q, JEONG J Y, *et al.* Power source sizing of fuel cell hybrid vehicles considering vehicle performance and cost [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(3): 527.
- [5] 温延兵. 氢燃料电池轿车能源与动力系统优化匹配及控制策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.
WEN Yanbin. Research on control strategy and optimization matching of energy and power system for hydrogen fuel cell car [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016.
- [6] 张来云. 增程式燃料电池汽车动力系统匹配及能量管理策略研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
ZHANG Laiyun. The power system matching and energy management strategy research of fuel cell range extender electric vehicle [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [7] 魏跃远,詹文章,林逸. 燃料电池混合动力汽车动力系统匹配与优化研究[J]. 汽车工程,2008,30(10):918.
WEI Yueyuan, ZHAN Wenzhang, LIN Yi. A study on the matching and optimization of FCHEV powertrain [J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(10): 918.
- [8] LIU X, DIALLO D, MARCHAND C. Design Methodology of hybrid electric vehicle energy sources: Application to fuel cell vehicles[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2011, 12(3): 433.
- [9] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2015 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [10] 朱昊,余卓平. 基于全生命周期评价的燃料电池汽车氢能路径分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(S1):138.
ZHU Hao, YU Zhuoping. Life cycle assessment of hydrogen pathways for fuel cell vehicles[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(S1): 138.
- [11] 吴嵘. 反映吸附强化焦炉煤气水蒸气重整制氢研究及其工艺评价[D]. 杭州:浙江大学,2014.
WU Rong. Studies on the ReSER-COG of hydrogen production and the technology evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [12] OU Xunmin, ZHANG Xiliang, CHANG Shiyan. Alternative fuel buses currently in use in China: Life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 406.
- [13] OU Xunmin, YAN Xiaoyu, ZHANG Xiliang, *et al.* Life-cycle analysis on energy consumption and GHG emission intensities of alternative vehicle fuels in China[J]. *Applied Energy*, 2012, 90: 218.
- [14] HASANBEIGI A, PRICE L, ADEN N, *et al.* A comparison of iron and steel production energy use and energy intensity in China and U. S. [R]. [S. l.]: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [15] SPANOS C, TURNEY D E, FTHENAKIS V. Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43: 478.
- [16] SULLIVAN J L, GAINES L. Status of life cycle inventories for batteries[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 58: 134.
- [17] DUNE J, GAINES L, BARNES M, *et al.* Material and energy flows in the materials production, assembly, and end of life stages of the automotive lithium ion battery life cycle, ANL/ESD/12-3[R]. [S. l.]: Argonne National Laboratory, 2012.
- [18] ALLY J, PRYOR T. Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus system: An Australian case study[J]. *Energy Policy*, 2016, 94: 285.
- [19] PAPASAVVA S, KIA S, CLAYA J, *et al.* Life cycle environmental assessment of paint processes[J]. *Journal of Coatings Technology*, 2002, 74(925): 65.
- [20] 中华人民共和国商务部. 机动车强制报废标准规定[EB/OL]. [2018-07-03]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/b/c/201301/20130100003957.shtml>.
Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Motor vehicle compulsory scrap standards [EB/OL]. [2018-07-03]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/b/c/201301/20130100003957.shtml>.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 汽车维修、检测、诊断技术规范: GB/T 18344—2016[S]. [S. l.]: 中国标准出版社, 2017.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for the inspection and maintenance of motor vehicle: GB/T 18344—2016[S]. [S. l.]: China Standard Press, 2017.
- [22] BURNHAM A, WANG M, WU Y. Development and applications of GREET2. 7—The transportation vehicle-cycle model[R]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2006.
- [23] AGUIRRE K, EISENHARDT L, LIM C, *et al.* Lifecycle analysis comparison of a battery electric vehicle and a conventional gasoline vehicle [R]. [S. l.]: California Air Resources Board, 2012.
- [24] 郭栋,朱文平,孙宇航,等. 城市电动公交车制动能量回收控制策略研究[J]. 汽车工程,2016,38(3):269.
GUO Dong, ZHU Wenping, SUN Yuhang, *et al.* A research on braking energy recovery control strategy for electric city bus [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(3): 269.
- [25] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
Society of Automotive Engineers of China. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.