

# 电动汽车生命周期评价研究进展\*

刘凯辉 徐建全

(福建农林大学,福建 福州 350000)

**摘要:**生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)被认为是21世纪最具价值的可持续发展支持工具之一。文章简要介绍了LCA的起源和发展、理论与方法;重点论述了LCA在电动汽车上的应用研究进展;提出我国应该尽早建立适合我国国情的电动汽车生命周期评价体系,以应对未来汽车节能化和环保化的挑战。

**关键词:**生命周期评价;环境影响;电动汽车

**中图分类号:**U469.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-4801(2016)01-127-06

近年来,我国汽车工业迅速发展,国内汽车保有量从2000年的1609万辆猛增到2014年的15447万辆,汽车产销双双超过2000万辆,创全球产销最高记录。但是也承受到汽车快速增长所带来的巨大压力,诸如石油大量消耗、环境污染、交通拥堵等一系列负面影响和问题已开始显现。节能与环保毋庸置疑已是未来发展主旋律。我国政府提出了建设节约型社会的基本国策,先后出台了《节能中长期专项规划》、《新能源汽车补贴及实施规则》等一系列鼓励性政策来支持新能源汽车的发展。而在新能源汽车领域,电动汽车凭借其经济效益好、资源消耗低和环境污染少的优势,成为未来汽车产业发展的方向并作为七大战略性新兴产业之一受到重视和扶持。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是对某种产品或某项生产活动从原料开采、加工、使用到最终处理的一种评价方法,被认为是21世纪最具价值的可持续发展支持工具之一。目前,汽车生命周期评价在中国的研究尚属于消化吸收阶段。而LCA中比较成型的一些方法主要是发达国家依据自身数据背景开发的,不适合中国国情。因此需要针对中国资源与环境现状,建立中国汽车生命周期评价模型,为制定汽车相关的环境政策和我国汽车产业的整体可持续发展战略提供参考。本文着重就LCA在电动汽车上的应用研究进展进行论述。

## 1 生命周期评价简介

### 1.1 生命周期的起源与发展

1990年,国际环境毒理学与化学学会(SETAC)主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会。会议首次提出“生命周期评价”的概念。1993年SETAC根据在葡萄牙的一次学术会议的总结,出版了一本纲领性报告“生命周期评价(LCA)纲要:实用指南”对LCA的发展具有重大意义<sup>[1]</sup>。经过20多年的实践,LCA有了国际化的标准,国际标准化组织先后发布了ISO 14041《生命周期评价目的与范围的确定,生命周期清单分析》、ISO 14042《生命周期评价生命周期影响评价》、ISO 14043《生命周期评价生命周期解释》、ISO/TR 14047《生命周期评价ISO 14042应用示例》和ISO/TR 14049《生命周期评价ISO 14041应用示例》等标准文件。

现阶段,随着科技化、信息化的发展,涌现出一批优秀的LCA分析工具,包括SimaPro、GaBi、IDEA和eBalance等,为生命周期评价使用者提供了便利,使生命周期评价过程更加高效,是生命周期评价方法的重大发展。

### 1.2 生命周期评价的理论与方法

#### 1.2.1 生命周期评价的基本概念

生命周期评价是一种评价产品、工艺或活动从原料采集,到产品生产、运输、销售、使用和回收整个生命周期阶段有关的环境负荷的过程<sup>[1]</sup>。它首先辨识和量化整个生命周期阶段中能量和物质的消耗以及环境释放,然后评价这些消耗和释放对环境的影响,最后提出方法来减少这些影响。其基本框架如图1所示。

\*福建省自然科学基金资助项目(2015J01282)

**作者简介:**刘凯辉(1992-),男,硕士研究生,研究方向:汽车产品生命周期评价。

徐建全(1977-),男,博士,副教授,研究方向:汽车产品生命周期评价、汽车技术与产业发展战略、汽车CAE工程分析。

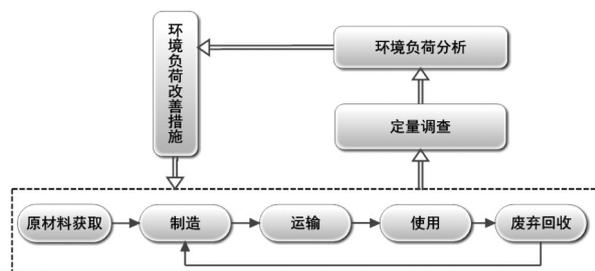


图1 生命周期评价的基本思想

### 1.2.2 生命周期评价的技术框架

ISO 14040 标准把 LCA 实施步骤分为目标和范围界定、清单分析、影响评价和结果分析 4 个部分,如图 2 所示。

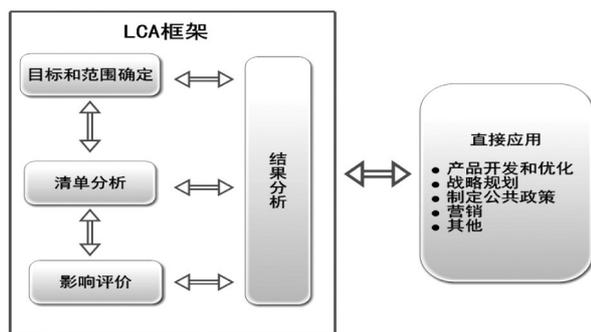


图2 LCA实施步骤

1) 目标与范围定义:是 LCA 的开始,也是关键的一步。“目标”即要说明开展本项研究的目的、原因及其意义。而“范围”既要说明产品的功能、系统边界、假定条件和限定条件等参数,更要保证研究范围的深度、广度和详细程度等符合目标的要求。

2) 清单分析:指对一种产品、工艺过程或活动在其整个生命周期内的能量与原材料需要量以及对环境的排放进行以数据为基础的客观量化过程。实际上就是原材料的提取、加工、制造、销售、使用和报废处理,从而为后续影响评价提供数据基础。

3) 影响评价:是 LCA 的核心部分。对清单分析阶段所识别的环境影响进行定量或定性的表征评价,即确定产品系统的物质、能量交换对外部环境的影响。影响评价包括:特征化、量化。特征化是将每一个影响类目中的不同物质转化和汇总成为统一的单元。量化即加权,是确定不同环境类型的相对贡献大小或权重,以期得到总的环境影响水平的过程。

4) 结果分析:根据规定的目的和范围,综合考

虑清单分析和影响评价提供的信息,寻求产品、工艺或活动的整个生命周期内减少能源消耗、原材料使用以及污染排放的可能,从而形成结论并提出建议<sup>[2]</sup>。

## 2 生命周期评价在电动汽车上的应用

研究与汽车相关联的环境污染、资源与能源利用问题既是环境保护的焦点问题,也是汽车工业健康、持续发展的关键问题。电动汽车在使用阶段无尾气排放,动力来源于蓄电池中储存的电能,被称为“零排放汽车”。但在中国,电力主要来源于用煤作燃料的火力发电,在发电过程消耗资源并产生了大量的环境污染物。从产品生命周期的角度来看,对环境造成的影响实际上转移到了发电过程,而并非真正意义上的“零排放”产品。因此,需要对电动汽车整个生命周期的环境影响做出定量分析<sup>[3]</sup>,从而确定其与传统汽车相比是否具有优势。

针对汽车生命周期评价,美国的阿岗国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)从汽车能源角度提出了“从油井到车轮”(Well-To-Wheel, WTW)的评价体系,并且有相应的评价模型。其研究对象是车用燃料,分成“燃料获取”(Well-To-Tank, WTT)和“汽车的使用”(Tank-To-Wheel)两个阶段,研究车用燃料整个生产和使用过程中的能源消耗、燃料经济性、污染物排放和温室气体排放等。

### 2.1 电动汽车生命周期评价的研究现状

近年来,有不少国内外学者用生命周期评价方法对电动汽车进行评估。主要从汽车全生命周期的环境效益和成本效益两方面对比分析电动汽车和传统汽车的差异以及不同类型电动汽车间的差异。

#### 2.1.1 电动汽车生命周期的环境效益分析

1) 纯电动汽车的生命周期研究。许多学者从排放角度出发,用生命周期评价方法对比研究纯电动汽车和传统汽车的生命周期排放。总的来说,相较于传统汽车,纯电动汽车在排放上具有相对优势,特别是碳排放;电网结构中火电比例的下降,使得这一优势更加显著。刘宏等(2007年)用生命周期评价方法从能耗、排放和燃油经济性 3 个方面对比分析纯电动汽车和传统汽油汽车全生

命周期过程,结果表明,电动汽车在这3个方面上都具有相对优势;另外他还指出以超微电动汽车为产业化突破口的市场发展策略,有利于我国电气化交通能源的发展<sup>[4]</sup>。施晓清等(2015年)用GaBi 4建模并采用CML 2001和Eco-Indicator 99影响评价方法对比分析北京市电动公交车和传统公交车的全生命周期过程,并对汽车报废里程和电力能源结构做敏感性分析:根据Eco-Indicator 99评价方法,电动汽车对环境的影响总体上优于传统汽车,尤其在减少化石能源消耗方面优势凸显,但在对生态系统质量影响和人类健康影响方面处于劣势;而CML 2001的分析结果表明,电动汽车在对全球变暖和臭氧层破坏等方面有明显改善;通过敏感性分析发现,随着新能源在电力能源中比例和报废里程的增加,电动汽车在节能减排方面优势明显<sup>[5]</sup>。Egede等(2015年)提出一种综合考虑电动汽车使用阶段影响因素的方法,使用这种方法,汽车厂家能够为不同的市场制定更加精确的设计策略;政府能制定符合当前国情的电动汽车发展政策<sup>[6]</sup>。Hong Huo等(2015年)对比分析中国和美国的电动汽车的排放,结果表明,电动汽车的排放取决于当地电网结构:在美国加利福尼亚州等地区,煤电比例低,与传统汽车相比电动汽车能够减少温室气体和空气污染物的排放;在中国和美国中西部各州,煤电比例高,电动汽车虽能够减少温室气体的排放,但它增加了空气污染物的排放<sup>[7]</sup>。

2)燃料电池汽车的生命周期研究。从能源角度(主要以氢能代替传统燃料)分析其生命周期环境效益,特别是研究不同方式获取氢能对其生命周期环境效益的影响。以当前的技术条件,天然气蒸汽转化氢能将是研究的重点。Hwang(2013年)对氢能源动力汽车氢能源的获取路径进行评估,分析各个路径下的能源消耗以及其对环境的影响:氢能源的获取路径有天然气蒸汽转化、玉米乙醇、用电网电解水、用太阳能发电电解水、煤炭气化和无碳封存6种,使用太阳能发电电解水获取氢能源在节能和温室气体排放方面具有最大的优势,而使用天然气蒸汽转换方式则在经济性上会更好<sup>[8]</sup>。邱彤和谢华伟(2004年)认为合理选择燃料电池汽车氢能系统是发展燃料电池汽车的前提,并运用生命周期评价方法的思想,编写了用于

氢能系统方案综合评价的专用软件,方便多方案的比较和敏感性分析<sup>[9]</sup>。Granovskii等(2006年)对氢电混合动力汽车进行生命周期评估,结果表明,综合考虑化石燃料的能源消耗和温室气体排放,氢燃料电池汽车的能源效率比传统汽车高25%~30%<sup>[10]</sup>。王菊等(2013年)用全生命周期GREET分析法对北京和上海开展的示范运行燃料电池公交车的氢能制取方法进行分析,综合考虑不同制氢方式的能耗、排放和经济性,为以后开展类似的示范项目提供参考<sup>[11]</sup>。

3)混合动力汽车的生命周期研究。混合动力汽车作为纯电动汽车代替传统汽车的重要过渡产品,其动力性和续航里程能和传统汽车相媲美。国内外学者研究混合动力汽车的全生命周期过程,发现其在节能环保较传统汽车有一定的优势。Samaras和Meisterling(2008年)用生命周期评估方法评估混合动力汽车温室气体排放,研究发现,与传统汽车相比,混合动力汽车能够减少32%的温室气体排放<sup>[12]</sup>。MacPherson等(2012年)用生命周期评估方法评估插电式混合动力汽车的燃油经济性和温室气体的排放并与EPA燃油经济性网站上的数据相比较,结果表明,插电式混合动力汽车能够减少一定量的温室气体排放<sup>[13]</sup>。杨茹等(2014年)运用生命周期评价方法研究一款非插电式混合动力汽车,结果表明,与传统的燃油汽车比较,混合动力汽车可节省资源28.9%、减少污染35.16%;其敏感性分析结果表明,钢和铝的回收对系统的资源消耗和排放的影响远大于铁和铜的回收<sup>[14]</sup>。

4)动力电池的生命周期研究。除了对电动汽车整车的研究外,还有许多学者致力于电动汽车零部件的生命周期评价,特别是电池的生命周期评价。动力电池是电动汽车的关键部件之一,是电力工业与汽车行业关键结合点。因此研究其全生命周期过程的能耗排放,对提高电动汽车的环保性具有重大意义。

Zackrisson等(2010年)对两款不同电解液的锂离子电池电动汽车进行生命周期评价,结果表明,使用水作为溶剂的锂离子电池效果优于使用N-methyl-2-pyrrolidone(NMP)作为溶剂的锂离子电池<sup>[15]</sup>。Cicconi等(2012年)用生命周期评价方法研究磷酸铁锂电池的二次使用,结果表明,锂离子

电池的二次使用对环境有积极的影响,实验收集的数据能够为以后锂离子电池的研究奠定一定的基础<sup>[16]</sup>。Matheys等(2006年)用生命周期评估技术评估5种不同材料电池(铅酸电池、镍镉电池、镍电池、氯化镍电池、锂离子电池)电动汽车对环境的影响,结果表明,对环境的影响最小的是锂离子电池,铅酸电池、镍镉电池和镍氢电池电动汽车对环境的影响差别不大,总体上电动汽车对环境的影响比传统汽车要小<sup>[17]</sup>。谢英豪等(2015年)用Eco-Indicator 99评价体系评估4种产业化制备镍钴锰酸锂的工艺,包括定向循环、传统湿法回收、传统火法回收和原矿冶炼,结果表明,对环境影响程度最小的工艺是定向循环工艺,而原矿冶炼对环境的损害最大<sup>[18]</sup>。

### 2.1.2 电动汽车生命周期的成本分析

一些学者从经济角度探讨电动汽车生命周期过程,为了寻找现阶段电动汽车成本高难以全面替代传统汽车的原因。

吴添等(2012)应用现值分析理论建立纯电动汽车生命周期成本评价模型。从消费者的视角对我国纯电动城市客车进行研究,包括空调的开启对生命周期成本的影响。结果表明,目前我国纯电动城市客车的生命周期成本远高于传统柴油车,空调的开启对纯电动汽车生命周期成本影响显著<sup>[19]</sup>。夏德建(2013)从生命周期视角综合分析电动汽车充电站在建设、运营和退出三个阶段的建设成本、运营成本 and 处置成本。得出在充电站导入市场的初期资金流为负值的结论,指出目前我国充电站的生命周期成本控制应注重前期研发设计和市场需求<sup>[20]</sup>。孟先春(2007)建立包括社会成本在内的汽车全生命周期成本模型。应用该模型对比分析混合动力城市公交车和传统公交车的全生命周期成本,研究表明,目前混合动力公交车生命周期成本比传统公交车高,主要是因为其研发成本和制造成本较高。通过敏感性发现,燃油价格和燃油效率是影响混合动力汽车发展的主要因素<sup>[21]</sup>。孔德洋等(2009)建立燃料电池电动汽车全生命周期消费者持有成本模型,能够预测燃料电池汽车消费者持有成本的变化趋势。从消费者视角,验证发展燃料电池的可行性,并指出政府的激励政策在燃料电池汽车产业化过程中的作用<sup>[22]</sup>。

从生命周期成本角度考虑,现阶段电动汽车的制造研发成本较同等级传统汽车高。主要原因是动力电池的成本太高,加上制造研发电动汽车的基础较为薄弱,前期相比于传统汽车,要投入大量的可行性分析成本、市场调研成本和实验成本等。此外,回收阶段处理电动汽车电池使得其回收成本也高于传统汽车的回收成本。虽然电动汽车在使用阶段的成本有优势,但是由于目前电动汽车充电站还不是很多,其建设成本无形中也加到了消费者身上。所以,目前电动汽车的出厂价格相比于同等级传统汽车要高很多,虽然国家有相应的补贴政策,但是其价格还是高于传统汽车,这使得现阶段电动汽车难以大量推广。

### 2.2 电动汽车生命周期评价方法的完善

为了更有效的解决实际问题,一些学者改进生命周期评价方法并应用于实际研究。Jongbae等(1998年)为了能够更有效的提高汽车的环保性能并且节约成本,提出了一种系统的、实用的整车生命周期评价方法,该方法首先把整车分成若干个模块,每个模块中包含10~20个子模块,结合整体到局部和局部到整体的分析方法,获得整车生命周期的详细数据,从而能够在短时间内完成整车的生命周期评价<sup>[23]</sup>。Joshi(2000年)用“投入—产出”方法来做产品的生命周期评估,指出目前的生命周期评估方法缺乏灵活性和整体性,且存在数据不够精密和成本高等问题,为此改进EIO-LCA模型,使它成为一种实用的、灵活的和系统化的生命周期评估工具,具有全面、快速且节省成本等优点<sup>[24]</sup>。McCleese和Lapuma(2002年)用蒙特卡洛模拟对电动汽车和内燃机汽车进行生命周期评估,预测生命周期每行驶1 km温室气体的排放和能源消耗的差异,结果表明,电动汽车能够减少挥发性有机化合物和CO<sub>2</sub>的排放<sup>[25]</sup>。

生命周期评价方法的发展不仅需要理论的支持,更依赖于基础数据库的开发。目前世界上有10多个著名的LCA数据库,例如日本的IEMA数据库、美国的NREL、瑞典的SPINE@CPM数据库和德国的PROBAS数据库等。我国虽于这方面的研究起步较晚,但也取得了一些研究成果:北京工业大学建立了材料环境协调性评价数据库,共收集金属材料、建材、陶瓷和基础能源等典型材料环境负荷数据5万余条,并研发配套的生命周期评

价软件;清华大学和四川大学也开展了汽车燃料、金属材料和建筑材料等的生命周期评价研究。

### 2.3 电动汽车生命周期评价存在的问题

目前,许多学者对电动汽车生命周期评价的研究具有一定的局限性。由于电动汽车全生命周期过程情况复杂,通常要涉及到成千上万个数据的收集,而真正能得到的准确信息非常有限,这使得在研究中通常采用典型工艺的平均水平、相近技术数据和一些经验估算的数据。在中国,由于生命周期评价的研究还不是很完善,许多基础数据库和评价模型都只能借鉴国外的研究,这样使得评价结果有一定的误差。而且由于生命周期评价指标的多样性,所以很多评价结果并不是通用的。对于电动汽车中的三大关键零部件之一的动力电池,其回收阶段的生命周期评价研究刚刚起步。针对这些,笔者认为国家和车企应致力于完善生命周期评价基础数据库,并依照自身国情,制定相关的评价标准。

## 3 结论与展望

鉴于近年来我国为了降低汽车工业的石油消耗,减少排放,改善人们的生活质量,推动传统汽

车向环境友好型汽车的转变,电动汽车的崛起顺应当今时代的发展。生命周期评价方法能够对产品的全生命周期中的能耗和排放进行全面的综合的量化分析,且能够在这基础上提出改善建议,对于制定电动汽车的发展策略有一定的参考作用。

目前,生命周期评价方法还存在以下不足:1)客观性的局限性。生命周期评价的实施者对评价方法的理解、对被评价系统的认识以及自身的知识背景和价值判断,都决定了LCA很难完全避免主观因素的影响;2)信息和数据的限制。由于评价指标的多样性,给产品生命周期的正确合理评价带来很大的困难;3)时间和区域的局限性。生命周期评价是对系统产生的环境效益在时间和空间上的集成,但无论评价所提供的原始数据还是评价结果,都无法充分体现时间性和区域性。

在我国,电动汽车的生命周期评价还属于消化吸收阶段,对这方面的研究还比较少。其中一些比较成型的评价模型都是发达国家依据自身情况开发的,不能完全照搬。应该尽早建立适合我国国情的电动汽车生命周期评价体系,以应对未来汽车节能化和环保化的挑战。

### 参考文献:

- [1] 霍李江.生命周期评价(LCA)综述[J].中国包装,2003(1):19-23.
- [2] 徐建全.生命周期评价(LCA)及其在汽车上的应用[J].机电技术,2011(5):143-146.
- [3] 张雷,刘志峰,王进京.电动与内燃机汽车的动力系统生命周期环境影响对比分析[J].环境科学学报,2013(3):931-940.
- [4] 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.
- [5] 施晓清,孙赵鑫,李笑诺,等.北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究[J].环境科学,2015(3):1105-1116.
- [6] EGEDE P, DETTIMER T, HERRMANN C, et al. Life Cycle Assessment of Electric Vehicles - A Framework to Consider Influencing Factors[J].Procedia CIRP, 2015(29):233-238.
- [7] HUO H, CAI H, ZHANG Q, et al. Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S[J]. Atmospheric Environment, 2015(108):107-116.
- [8] HWANG J-J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19(1): 220-229.
- [9] 邱彤,谢华伟.FCV氢源系统生命周期评价及其软件实现[J].计算机与应用化学,2004,21(1):16-18.
- [10] GRANOVSKII M, DINCER I, ROSEN M. Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(3): 337-352.
- [11] 王菊,尤可为,于丹.燃料电池公共汽车在北京和上海载客示范评价[J].汽车技术,2013(10):19-21.
- [12] SAMARAS C, MEISTERLING A K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy[J]. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2008, 42(9): 3170-3176.
- [13] MACPHERSON N D, KEOLEIAN G A, KELLY J C. Fuel Economy and Greenhouse Gas Emissions Labeling for Plug-In Hybrid Vehicles from a Life Cycle Perspective [J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(5): 761-773.
- [14] 杨茹,冯超,张耀伟,等.混合动力汽车的全生命周期评价[J].新能源进展,2014,(2):151-156.
- [15] ZACKRISSON M, AVELL N L, B J O. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles-Critical issues[J]. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(15): 1519-1529.

(下转第136页)

产品线。  
3) 致力于打造高品质产品,同时加大广告宣传投入力度,提高品牌知名度及现有服务质量,进一步提高企业核心竞争力。

#### 参考文献:

- [1] 卫进东. 长城汽车股份有限公司发展战略研究[J]. 河北软件职业技术学院学报, 2014(2).
- [2] 陈飞, 严唯. 基于EFE和IFE矩阵的长安微车的发展战略分析[J]. 现代营销, 2011(5).
- [3] 雷霖, 万素波, 找永鑫, 等. 四川汽车技术自主创新模式与发展战略研究[J]. 成都大学学报(社会科学版), 2015(1).
- [4] 胡晓峰. 中国汽车产业发展规划研究[J]. 科技视界, 2015(17).
- [5] 倪达. 五十铃汽车公司的研究发展战略[J]. 汽车科技, 2000(3).
- [6] 赫连志巍, 胡雪峰. 华晨汽车品牌发展战略研究[J]. 现代商业, 2010(9).



(上接第131页)

- [16] PAOLO CICONI D L, ALESSANDRO MORBIDONI, MICHELE GERMANI. Feasibility analysis of second life applications for Li-Ion cells used in electric powertrain using environmental indicators; proceedings of the 2nd IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition[C]. Florence: IEEE, 2012: 985-990.
- [17] FINKBEINER M, INABA A, TAN R, et al. The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 80-85.
- [18] 谢英豪, 余海军, 欧彦楠, 等. 废旧动力电池回收的环境影响评价研究[J]. 无机盐工业, 2015(4): 43-46, 61.
- [19] 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(12): 1150-1154.
- [20] 夏德建. 电动汽车充电站项目的生命周期成本分析[J]. 重庆文理学院学报(社会科学版), 2013, 32(6): 94-99.
- [21] 孟先春. 基于全生命周期理论的两种公交车成本差异分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [22] 孔德洋, 马钧, 王宁. 基于全生命周期的FCVs消费者持有成本模型[J]. 工业工程与管理, 2009(1): 81-84.
- [23] HA J, MIN S K, HUR T, et al. Practical Life Cycle Assessment Methodology for a Whole Automobile[J]. SAE, 1998. doi: 10.4271/982188.
- [24] JOSHI S. Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques[J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 3(2&3): 95-102.
- [25] MCCLEESE D L, LAPUMA P T. Using Monte Carlo simulation in life cycle assessment for electric and internal combustion vehicles[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(4): 230-236.