

# 基于过程生命周期方法的动力电池碳足迹评价系统设计及开发

毕永强 李柏姝 刘世伟

(沈阳理工大学汽车与交通学院, 沈阳 110159)

【欢迎引用】毕永强, 李柏姝, 刘世伟. 基于过程生命周期方法的动力电池碳足迹评价系统设计及开发[J]. 汽车文摘, 2025(1): 52-56.

【Cite this paper】BI Y Q, LI B S, LIU S W. Design and Development of a Carbon Footprint Evaluation System for Power Batteries Based on PLCA[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(1): 52-56.

【摘要】为了研究动力电池在整个生命周期中的碳足迹, 设计开发一款易于操作的碳足迹评价系统。以过程生命周期(PLCA)方法为基础, 结合 Python 和 Django 框架进行系统设计和开发。最后, 利用该系统对磷酸铁锂电池(LFP)的碳足迹进行了定量分析。研究表明, 在 LFP 动力电池的全生命周期中, 碳排放量最高的是原材料制备阶段, 达到 3 950.098 7 kg CO<sub>2</sub>e, 运输阶段的碳排放量最少, 仅为 45.661 kg CO<sub>2</sub>e。

关键词: 过程生命周期方法; 动力电池; 碳足迹; 碳排放

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240090

## Design and Development of a Carbon Footprint Evaluation System for Power Batteries Based on PLCA

Bi Yongqiang, Li Baishu, Liu Shiwei

(School of Automobile and Transportation, Shenyang University of Technology, Shenyang 110159)

【Abstract】In order to study the carbon footprint of power battery in its whole life cycle, an easy-to-operate carbon footprint evaluation system is designed and developed. Based on the Process-Based Life Cycle Assessment(PLCA) method, the carbon footprint evaluation system is designed and developed with Python and Django Framework. Finally, the carbon footprint of lithium iron phosphate(LFP) battery is quantitatively analyzed by using the system. The results show that throughout the entire life cycle of power batteries, the highest carbon emissions occur during the raw material preparation stage, reaching 3 950.098 7 kg CO<sub>2</sub>e. The carbon emissions during the transportation phase are the lowest, with 45.661 kg CO<sub>2</sub>e.

**Key words: Process-based Life Cycle Assessment (PLCA) method, Power battery, Carbon footprint, Carbon emission**

## 0 引言

当前, 汽车行业的能源消耗高, 碳减排的潜力比较大, 所以现阶段对汽车产品的碳足迹研究势在必行。国家“十四五”规划纲要中提出, 要加快壮大新能源汽车产业, 加快推动绿色低碳发展<sup>[1]</sup>。动力电池凭借其优良的环保性能和较低的使用成本很快占据了传统燃油车的市场份额, 成为实现双碳目标的重要途径。

关于动力电池碳足迹评估系统的研究, 李建西<sup>[2]</sup>等采用生命周期评价方法分析了当前我国退役动力电池

循环利用系统的能耗和碳足迹。孙杰<sup>[3]</sup>等针对废锂电池回收再生高镍三元正极材料(LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub>, NCM811)三元前驱体典型湿法冶金工艺, 从减污降碳的视角, 对全流程各环节进行了生命周期综合评价分析。徐加雷<sup>[4]</sup>以《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》(ISO 14047:2018)为依据, 以等量镍资源生产 1 t NCM811 电池的正极材料为目标, 对新能源汽车动力电池行业退役低 NCM811 电池回收再利用过程的碳足迹进行研究。吴奔奔等<sup>[5]</sup>对锂镍锰钴酸氧化物(Nickel Manganese Cobalt, NMC)与磷酸铁锂(Lithium Iron Phosphate, LFP)2种动力电池按照梯次利用或循

循环利用的2种路径进行情景分析,数据分析表明NMC动力电池通过循环利用更有利于碳减排;而LFP动力电池通过梯次利用更利于碳减排。陈轶嵩等<sup>[6]</sup>以某款已上市纯电动汽车为研究对象,分别匹配4款常用动力电池,基于软件建立生命周期评价模型,对其进行2021年与2030年全生命周期能源消耗与环境排放研究,并选取关键参数因子进行敏感性分析。

综上所述,国内研究者采用生命周期评价方法,从不同角度对动力电池的碳足迹进行了研究,但是在汽车动力电池碳足迹评价系统的设计和开发方面的研究相对较少,导致相关领域的技术积累不足,影响了国内动力电池碳足迹评价技术的发展和创。由于该领域缺乏深入研究,许多研究者在进行汽车动力电池碳足迹评价时,主要依赖国外的软件工具,这可能带来技术引进成本高、技术掌握不足等问题。此外,一些国外软件在操作上存在语言障碍、界面复杂、技术支持不足等缺点,导致国内研究者在使用这些软件时遇到困难,影响了研究效率和结果的准确性。因此本文旨在基于过程生命周期(Process-Based Life Cycle Assessment, PLCA)方法,使用Python和Django设计开发一款操作简单、界面友好的动力电池碳足迹评价系统,旨在为汽车行业的研发人员和开发者提供数据支撑。

## 1 动力电池碳足迹核算方法分析

### 1.1 碳足迹核算方法

碳足迹核算方法主要包括3种:投入产出的生命周期评价方法(Economic Input-Output Life Cycle Assessment, EIOLCA)、基于清单分析的过程生命周期评价方法(PLCA)、混合生命周期评价方法(Hybrid Life Cycle Assessment, HLCA)<sup>[7-8]</sup>。各方法的优缺点见表1。

表1 碳足迹核算方法优缺点

碳足迹核算方法	优点	缺点
EIOLCA	投入小且具有综合性	不适合微观产品分析
PLCA	针对性强且适合微观系统	成本高、存在截断误差
HLCA	准确性、适用性高	理论要求高、精确度难控制

本研究旨在评估汽车动力电池在全生命周期中的碳排放情况。考虑到研究对象相对微观,主要关注动力电池在原材料制备、运输装配、使用维护、报废回收等环节的碳排放。PLCA方法能够全面、综合地评估碳排放,符合本研究的要求,被选为评价工具。

## 1.2 动力电池模型

### 1.2.1 原材料制备阶段

原材料制备阶段是将矿石等自然资源经过开采、运输、加工等过程制成金属或者非金属。原材料制备阶段的碳排放主要来源于资源开采、资源加工等工序所产生的碳排放量。原材料制备阶段碳排放的公式为:

$$C_A = \sum_{i=1}^n M_{A_i} \cdot C_i \quad (1)$$

式中: $C_A$ 为原材料制备阶段的碳排放量, $M_{A_i}$ 为汽车动力电池各部分材料的质量, $C_i$ 为汽车动力电池各部分材料的碳排放因子<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 运输装配阶段

运输装配阶段的碳排放量主要是交通工具和动力电池装配所产生的碳排放<sup>[9]</sup>。

考虑到运输工具从某一地点到另一地点返程时空荷,引入修正系数 $t$ ,即实际运距等于单程运输距离乘以 $t$ 。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n G_i \times J_i \times D_i \times t \quad (2)$$

式中: $n$ 为运输方式类别, $G_i$ 为第 $i$ 类运输方式动力电池运输量, $J_i$ 为动力电池从原材料制备地点到装配地点的运输距离, $D_i$ 为所选运输工具的碳足迹因子<sup>[9]</sup>, $t$ 为空车修正系数,根据文献[10]可知空载时的环境负荷是满载时的0.67倍,故取 $t=1.67$ 。

$$C_2 = \sum_{i=1}^n G_i \times F_i \times D_i \times 1.67 \quad (3)$$

根据文献[11]可知,电池装配阶段电能消耗与质量成正比,约为2.67 MJ/kg<sup>[11]</sup>。装配阶段的碳排放量等于电能消耗乘以该区域电力碳排放因子。

### 1.2.3 使用维护阶段

动力电池主要功能是为电动汽车提供电力,其使用阶段的能耗可分成2部分:一部分来源于电池充放电过程的电能损耗,另一部分来源于电动汽车承载电池质量所增加的电能损耗<sup>[12]</sup>。为评价该阶段能耗,本文假设车辆本身质量引起的能量消耗为电动汽车能量消耗的28%。文献[13]研究动力电池的充放电效率为90%,则动力电池使用阶段能耗计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$EC_{\text{battery}} = \frac{M_{\text{battery}}}{M_{\text{car}}} \times 28\% \times \frac{EC_{\text{car}}}{\eta} + EC_{\text{car}} \times (1 - \eta) \quad (4)$$

式中: $EC_{\text{battery}}$ 为锂电池使用阶段电能损耗, $M_{\text{battery}}$ 为电池质量, $M_{\text{car}}$ 为汽车质量, $EC_{\text{car}}$ 为汽车使用阶段汽车总耗电量, $\eta$ 为充放电效率。

### 1.2.4 报废回收阶段

动力电池报废回收阶段采用湿法回收技术,其排放和消耗主要来自2方面:(1)在机械破碎过程中的电力消耗;(2)追溯至所用溶剂的生产阶段,生产所用溶剂产生的一部分间接排放和能源消耗<sup>[15]</sup>。报废回收阶段碳排放的公式如下<sup>[8]</sup>:

$$C_A = \sum_{i=1}^n M_{A_i} \cdot C_i \quad (5)$$

式中: $C_A$ 为报废回收阶段的碳排放量, $M_{A_i}$ 为各溶剂的质量和电力的消耗, $C_i$ 为碳排放因子。

## 2 动力电池碳足迹评价系统设计

### 2.1 系统分析

需求分析是系统开发流程中至关重要的阶段,包括系统可行性分析、功能性需求和非功能性需求。系统可行性分析包括技术可行性、经济可行性和操作可行性。功能性需求分析着重于系统实际功能的设计和解决问题能力,是系统完整开发的基础。而非功能性需求分析则关注系统的外观、性能、安全性等方面,确保系统能够满足用户期望。在进行汽车动力电池碳足迹评价系统开发之前,必须对系统功能和任务进行全面分析与概括,以确立清晰的需求目标。该过程涉及用户需求的深入理解,功能设计的合理规划,以及系统性能的可靠保障。只有通过充分的需求分析,系统开发才能顺利进行,最终实现用户和利益相关者的期望。

#### 2.1.1 系统可行性分析

(1)技术可行性。本文的汽车动力电池碳足迹评价系统主要涉及前、后端相关技术,包括 Html+Css+JavaScript、Django、Python 语言、数据库技术。前端用于结果的呈现和逻辑运算,后端用于系统的管理以及基于 Django 框架搭建实现动力电池碳足迹评价模型和相关的算法。MySQL 数据库用于存储用户和管理员信息以及计算所需的数据,故此研发该系统在技术上具备可行性。

(2)经济可行性。该系统开发具有经济优势,包括简捷直观的用户界面、开源资源库以及其他免费软件资源。该平台所需人力和硬件资源都较少,只需一台笔记本电脑即可完成。

(3)操作可行性。本文所开动力电池碳足迹具有简单易用的操作流程,用户可以在任何时间、任何地点进行操作。而且由于该系统基于 web 平台,用户可轻松利用浏览器进行操作,无需本地运

行。因此,研发该系统具备操作可行性。

#### 2.1.2 功能性需求分析

汽车动力电池碳足迹评价系统的目的是让使用者快速计算动力电池在全生命周期各阶段的碳排放,故该系统需要具备计算动力电池碳排放的功能。其次,系统不能仅计算系统自带电池的碳排放量,还能够由用户输入自己需要的电池的数据进行计算。若计算所用的数据不确定,还得对参数进行不确定性分析,以便找到最合适的数值。为了保证系统的安全性,系统需具备用户注册和登录功能。除此之外,系统中自带的数据库不能被用户随意更改,且需要对用户进行管理。因此,该系统需具备一个拥有用户登录、数据管理、用户管理功能的后台进行管理。

#### 2.1.3 非功能性需求分析

系统需要满足相关的非功能性需求,主要包括数据准确性、系统响应时间、界面操作简便性、可靠性。

(1)数据准确性。汽车动力电池碳足迹评价系统的数据准确性主要取决于动力电池在原材料制备阶段、运输阶段、装配阶段、使用阶段和报废回收阶段物资、能源和碳排放因子的精确度。以上数据精确度越高,计算出的碳排放量越能反应实际问题,可以为电池的设计和优化提供更好的参考。

(2)系统响应时间。系统响应时间包括时间长度和时间的易变性。系统响应时间的恰当长度至关重要,过长的响应时间可能导致用户焦虑,而过短的响应时间则可能让用户感到紧张。系统响应时间的易变性反映界面响应时间与平均响应时间之间的差异,差异越小,系统的响应时间易变性就越低,这有助于用户保持稳定的心态和一致的操作频率。在设计系统响应时间时,需要综合考虑用户心理和行为特征,以确保用户体验的顺畅和舒适。适中的系统响应时间能够促进用户的专注和效率,提升系统的可用性和用户满意度。因此,在系统开发过程中,需重视系统响应时间的设定,并通过合理的优化和测试确保系统响应时间在用户可接受的范围内,从而提升用户体验和系统的整体性能。

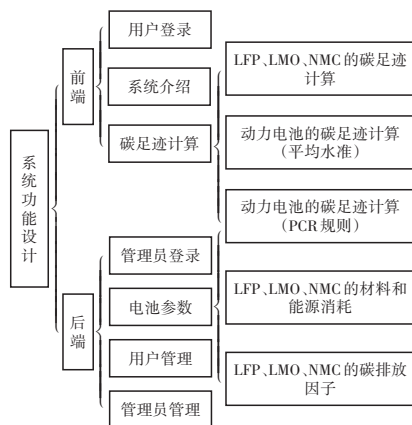
(3)界面操作简便性。用户应能快速理解界面操作、容易操作、输入参数简捷。这样设计能提升用户体验,降低学习成本,增加系统易用性。

(4)可靠性。系统的数据不易丢失,且能保证用户信息安全。

## 2.2 系统功能设计

动力电池碳足迹评价系统分为前、后端,前端的

主要功能为:用户登录和注册、系统介绍、碳足迹计算;后端的主要功能为:管理员登录、管理员管理、用户管理、电池参数管理。系统功能见图1。



注: 锰酸锂(Lithium-Manganese Oxide, LMO)

图1 动力电池碳足迹系统功能

系统前端具体功能包括:(1)用户登录:打开系统时,用户输入账号和密码进入系统,用户还可在登录界面进行注册。(2)系统介绍:在系统前端界面的首页有关于系统的介绍,用户可据此快速掌握系统。(3)碳足迹计算:该系统的碳足迹计算包括两部分。第一部分是系统自带的LFP、LMO、NMC动力电池碳足迹计算。第二部分是根据平均水准和产品种类规则(Product Category Rules, PCR)规则计算的动力电池碳足迹。平均水准下的动力电池碳足迹是估算值,可根据用户提供的数据进行计算,也可使用系统内置数据进行估算。此外,还可以通过蒙特卡洛分析进行参数估计。PCR规则下的动力电池碳足迹计算更为精确,但需要更详细的数据。PCR规则是为动力电池的环境产品声明(Environmental Product Declaration, EPD)和碳足迹声明提供了要求和指导,可用于评估动力电池生产的环境属性。系统前端界面见图2。



图2 系统前端界面

系统的后端具体功能包括:(1)管理员登录:该功能只用于管理员登录到后台界面。(2)电池参数管理:主要为LFP、LMO、NMC动力电池在原材料制备阶段、运输装配阶段、报废回收阶段的材料、能源消

耗以及其对应的碳排放因子。除此之外,管理员可以对数据进行修改、更新、删除等操作。(3)用户管理:在这个模块下管理员可以对前端用户进行管理。(4)管理员管理:管理员不能直接进行注册,须由现有管理员添加。系统后端界面见图3。

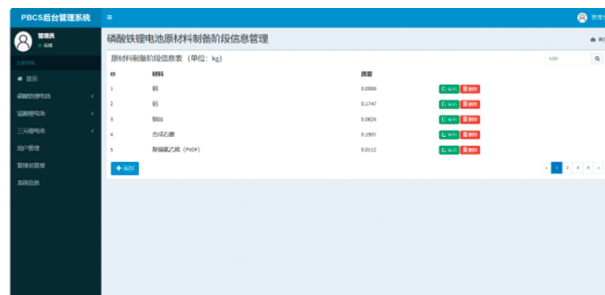


图3 系统后端部分界面

## 2.3 数据库设计

该系统采用开源的关系型数据库管理系统MySQL数据库,广泛用于Web应用程序的数据存储和管理。它支持多种操作系统,包括Windows、Linux和Mac OS。MySQL的优点包括高性能、可靠性、易用性和灵活性。它支持多种数据类型、索引和存储引擎,可以满足不同应用场景的需求。Django提供了根据类自动创建数据表的方法,通过Model模块与数据库形成ORM<sup>[16]</sup>,将创建的表上传到数据库,大幅减少了创建数据表的工作量,在MySQL中创建的表包括:(1)用户信息表:用来保存已注册用户的信息,可以保证用户正常登录系统。(2)管理员信息表:用来保存管理员的信息。(3)动力电池参数表:用来保存LFP、LMO、NMC动力电池在全生命周期过程中的材料、能源消耗以及碳排放因子,同时还保证除系统自带的动力电池碳足迹的计算。(4)Django表:Django框架自带的表,可以保证系统正常运行。

## 3 应用实例

本文以72 kW·h的动力电池为例进行计算。设定汽车的整备质量为1 815 kg,纯电动汽车的百公里电耗为12.50 kW·h/100 km,汽车可运行的公里数为200 000 km。根据文献[17]可知,60.48 kW·h的LFP电池装配阶段所消耗的电能为1 324.053 MJ,电池装配阶段电能消耗与质量成正比,约为2.67 MJ/kg,故72 kW·h的LFP电池的质量为590.36 kg。LFP电池全生命周期各阶段碳排放计算结果见表2。

表2的计算数据表明,LFP电池在全生命周期阶段中,碳排放量最高的是原材料制备阶段,达到3 950.098 7 kg CO<sub>2</sub>e。其次是使用阶段,碳排放量为

2 784.528 4 kg CO<sub>2</sub>e,紧随其后的是报废回收阶段,碳排放量为 2 052.976 9 kg CO<sub>2</sub>e。装配阶段的碳排放量相对较低,为 242.413 3 kg CO<sub>2</sub>e,而运输阶段的碳排放量最少,仅为 45.661 0 kg CO<sub>2</sub>e。综合来看,LFP 电池在整个生命周期过程中的碳排放量主要集中在原材料制备和使用阶段。

表2 LFP 电池生命周期各阶段的碳排放 kg CO<sub>2</sub>e

生命周期阶段	碳排放量
原材料制备阶段	3 950.098 7
运输阶段	45.661 0
装配阶段	242.413 3
使用阶段	2 784.528 4
报废回收阶段	2 052.976 9

#### 4 结束语

设计并开发了汽车动力电池碳足迹评价系统,该系统具有操作简便、计算结果可靠等特点,可以为汽车行业动力电池的碳足迹评价提供一定的技术帮助。内置的数据也可以根据用户需要进行更新,从而保持评价系统的准确性和实用性。

磷酸铁锂动力电池在全生命周期中的碳排放主要集中在原材料制备阶段和使用阶段,而运输阶段的碳排放较少。因此,可以考虑优化原材料制备阶段和使用阶段,以减少碳排放量,从而降低整体碳足迹。这种优化可能涉及采用更环保的生产方法、提高资源利用效率等措施,有助于提升动力电池的环境友好性和可持续性。

#### 参 考 文 献

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[J]. 中国水利, 2021(6): 1-38.

[2] 李建西, 李英顺, 庄绪宁, 等. 基于生命周期评价的退役三元锂电池循环利用系统能耗与碳足迹分析[J]. 上海第二工业大学学报, 2022, 39(1): 1-9.

[3] 孙杰, 董强, 张笛, 等. 基于 LCA 的废锂电池典型回收再生工艺碳足迹分析和环境影响评价[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 1254-1259+1263.

[4] 徐加雷, 余海军, 谢英豪, 等. 退役动力电池回收再利用碳足迹研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(8): 1092-1095+1100.

[5] 吴奔奔, 余海军, 谢英豪, 等. 基于退役量预测下动力电池梯次与循环利用碳足迹分析[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 807-811+818.

[6] 陈轶嵩, 郝卓, 兰利波, 等. 匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期节能减碳评价研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 517-527.

[7] 王永琴, 周叶, 张荣. 碳排放影响因子与碳足迹文献综述: 基于研究方法视角[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 155-159.

[8] 叶金屏. 面向全生命周期的汽车保险杠碳足迹评价研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.

[9] 宋晓聪, 杜帅, 谢明辉, 等. 废旧三元锂离子电池回收利用碳足迹[J]. 环境科学, 2024, 45 (6): 3459-3467.

[10] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.

[11] 马金秋. 匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.

[12] 卢强. 电动汽车动力电池全生命周期分析与评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

[13] 殷仁述. 中国车用锂离子动力电池生命周期评价研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

[14] 李响. 基于全生命周期的电动汽车锂电池环境效益评价[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.

[15] 蒋莹莹. 锂离子动力电池生命周期评价方法及系统开发[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.

[16] 卫丽娜, 尹旭宏, 张林. 线上一流课程建设系统的设计[J]. 物联网技术, 2023, 13(12): 156-159+162.

[17] 刘书如. 锂离子动力电池及纯电动汽车生命周期评价对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.

(责任编辑 明慧)