

文章编号: 1672-6197(2019)06-0025-04

## 基于 AnyLogic 的车用锂电池回收模型仿真

郑春燕<sup>1</sup>, 张海<sup>2</sup>, 郭栋<sup>2</sup>, 王娟<sup>2</sup>, 李春栋<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学 管理学院, 山东 淄博 255012;

2. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** 如何有效回收电动汽车废旧锂电池是目前亟需解决的问题。建立互联网+技术+服务模式, 基于生产者责任延伸制度, 联合生产者建立大型回收中心和全国性回收网络, 构建国家级信息平台, 实现电池编码制度和各环节可追溯, 对所构建网络提出政策建议, 明确各主体的责任, 为电池回收模型的建立提供依据; 利用 AnyLogic 软件的智能体理论对动力电池整个全生命周期建立模型, 仿真分析未来 10 年电池累计存量及电池应用途径等指标变化规律。仿真数据表明回收模型在建立初期投入较大, 回收效率较小, 中期见效明显, 后期持续平稳的增长, 该模型能够实现废旧电池的有效循环利用。

**关键词:** 车用锂电池; AnyLogic; 回收模型; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI:10.13367/j.cnki.sdgc.2019.06.006

### AnyLogic – based simulation of recovery model for lithium battery of the electric vehicle

ZHENG Chunyan<sup>1</sup>, ZHANG Hai<sup>2</sup>, GUO Dong<sup>2</sup>, WANG Juan<sup>2</sup>, LI Chundong<sup>2</sup>

(1. School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255012, China;

2. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** How to recycle the waste lithium battery of electric vehicle reasonably and effectively is an urgent question to be solved at present. The internet + technology + service model is proposed based on extended producer responsibility. In the model, producers jointly set up a large recycling center and the national recycling network to build a national information platform. The battery coding system is implemented and the various links can be traceable. Policy suggestion on each link of the network and how to make clear the responsibility of each subject is also put forward. The whole life cycle model of power battery is built by using the Agent theory of AnyLogic software. Simulation analyzed the change trend of cumulative stock of the battery, battery applications and other indicators in the next 10 years. Simulation data show that the early stage of the establishment has small recovery efficiency but needs great investment. The middle term effect is obvious and grow steadily in the later period. The model can achieve the effective recycling of waste batteries.

**Keywords:** lithium battery for vehicle; AnyLogic; recovery model; simulation

自从 2009 年实行新能源汽车“十城千辆工程”以来, 全国新能源汽车的市场份额不断提高, 由此而

带来大量电动汽车废旧电池亟需回收处理<sup>[1]</sup>。据预测, 到 2020 年, 报废量将达到 20 万 t, 累计报废量

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605265, 51508315); 山东省自然科学基金项目(ZR2014EL036)

第一作者: 郑春燕, 女, jiaoyun547@163.com; 通信作者: 郭栋, 男, ghyuyu@163.com

50 万 t; 2024 年前后,动力电池报废量将达到 34 万 t,累计报废量将达到 116 万 t<sup>[2]</sup>。针对电池回收的问题,《电动汽车动力蓄电池回收利用技术政策(2015 年版)》正式明确建立动力电池编码制度和可追溯体系;在资金激励措施上,国家在现有资金渠道内对梯级利用企业和再生利用企业的技术研发、设备进口等方面给予支持;在技术研发方面,国家支持动力蓄电池相关回收利用技术和装备的研发<sup>[3]</sup>。七部委印发的《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》(工信部联节[2018]43 号)提出落实生产者责任延伸制度、政府引导与市场相结合、设立废旧动力电池回收处理基金等多方面行业发展建议<sup>[4]</sup>。由于我国的电动汽车起步相对较晚,动力电池回收利用网络尚未启动,电池企业及相关储能企业在动力电池回收业务上大多刚刚布局,因此亟需尽快制定实施与当前电动汽车发展相适应的电池回收网络模型。

目前关于废旧电池回收研究可以分为两类:(1)对于彻底不能恢复使用的报废电池的研究,核心内容是对电池电极材料中有价金属进行回收;(2)对于还有残余容量的电池的再利用研究,重点是对已经使用过并且额定容量下降至 80% 左右的电池进行重新检测、分选、组合、再利用<sup>[5]</sup>。依据电池的发展情况和市场环境需求,未来电池回收再利用必将向着综合利用以及多样化处理的方向发展。

本文建立互联网+技术+服务的网络模型,建立线上线下全方位服务系统,实现线上查询、线下回收流通,构建国家级信息化平台,建立专门的回收管理系统网络;建立以大型电池生产企业为龙头的联合经销商和回收利用企业的专业化回收网络,有利于电池生产的统一化、标准化;利用销售途径建立逆向物流回收网络,依靠法律政策明确回收网络中各环节主体的责任,保证回收网络切实高效可行;最后用 AnyLogic 软件在理想状态下对模型进行仿真。

## 1 电池回收模型建立

### 1.1 电动汽车锂电池回收模型

本文所建立的回收路径网络模型在运行过程中,详细记录动力电池从生产、使用、回收、梯级利用的全生命周期过程,构建过程可查核、可测量的管理系统,实现对回收网络中各节点的统一监管,为各项制度的制定提供可靠的数据支持。各电池销售点同

时也是回收点,消费者将电池送往回收点,再由回收点经回收网络送往回收中心,回收中心要做检测,一部分报废分解,一部分进入梯级利用企业,一部分经过修复后再进入电动汽车网络,这是一种基于动力电池的生产、消耗、回收和资源再利用的全生命周期模型<sup>[6]</sup>,所建回收模型如图 1 所示。

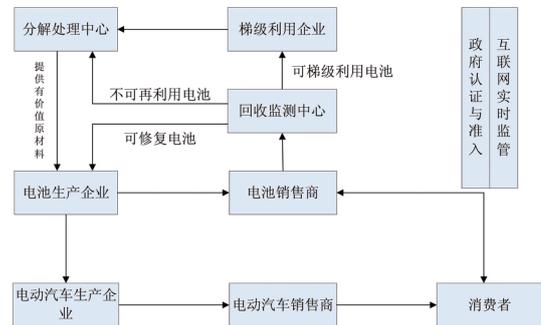


图 1 电池回收路径网络示意图

Fig. 1 The path network schematic diagram of battery recycling

### 1.2 各方责任以及技术要求

相关部门要研究制定回收行业的准入条件,推动相关技术标准体系建设,用法规制度明确各环节的责任主体<sup>[7]</sup>。生产者有义务在产品的全生命周期的整个过程中承担环保责任;各销售商有责任对废旧产品进行回收;加强企业、媒体的宣传教育,让广大消费者认识到废旧动力电池对环境和人体健康危害的严重性,增强消费者的环保意识,使消费者积极参与废旧动力电池的回收处理过程中;回收中心承担废旧电池的检测、分类、拆解等工作<sup>[8]</sup>;回收监测中心对回收的废旧电池容量进行鉴定。如果电池容量高于 80%,则送往电池生产企业进行修复处理;如果电池容量低于 80% 高于 30%,则运往梯级利用企业再利用;如果电池容量低于 30%,就运往分解处理中心用环保的方式进行分解处理,回收有价值的原材料。

## 2 电池回收模型仿真

### 2.1 AnyLogic 软件基本介绍

目前基于 Agent 的复杂适应系统建模有 AnyLogic、Swarm 等仿真平台,其中 AnyLogic 平台是应用最广泛的平台之一。它是在复杂适应系统理论上开发的标准计算机仿真多主体软件工具集,其功能模型库完整,功能强大,可以模拟物理系统、经济系统或社会系统,且为开源软件,较为适合研究性工作的开展,是一个灵活、高效、可靠的仿真环境,目

前在经济、交通、电力系统等领域应用广泛<sup>[9]</sup>。AnyLogic 软件不仅涵盖了建模的全周期所需要的各种功能和要求,还具有二维以及完善的三维模型显示功能。Agent 作为自主的个体,在一定目的驱动下,具有对自身行为和内部状态的自我控制能力,能够不受人或其他 Agent 的直接干预。为建立科学合理的废旧电池回收模式,本文选取 AnyLogic 平台进行基于多智能体的废旧电池回收模型仿真开发。

## 2.2 回收模型仿真相关参数设置

在该模型的建立仿真过程中,首先在理想状态下做出假设:(1)统计数字显示,近年来电动汽车产销量相差较小,因此假设电池生产厂商的产销平衡,不存在滞销现象;(2)在国家宏观调控下建立并运行该模型,文中提到的政策和技术可以在相应的场合顺利应用;(3)只考虑电池生产商为供给电动汽车运行而生产的电池量,不考虑用于通讯、新能源储能等其他领域的电池;(4)假设电动汽车的寿命为 120 个月,电池的寿命为 40 个月;(5)假设电池只在达到使用寿命时才报废,忽略因其他因素导致的电池报废的情况。

在理想状况下,电池与电动汽车按 3:1 的比例生产,由电动汽车 2016 年年产量 80 000 辆,得到电动汽车电池年产量为 240 000 块,即每周生产 4 615 块。为分析方便,将数据按比例缩小 200 倍,即设电池单体初始值有 1 200 块,模型每一步长代表一周,一周生产率为 24 块,在产销平衡情况下电池生产数量等于运往下一级的数量。数据预测得到 2017 年电池的生产量为 420 000 块,按比例缩小 200 倍得到年产量为 2 100 块,之后每年都按相同比例增长;因为假设电池寿命为 40 个月,则设置处于电动汽车上的步长为 171,运往汽车制造商的电池比例为 1/3,剩余的运往各销售商;1 年按 52 周计,设置 520 个步长可得到 10 年中相关参数的数据仿真结果。

模型参数设置如图 2 所示。其他主要的参数还包括:

1) My\_New\_Flag: 记录该电池是新电池还是二次电池,在动力电池进入 in\_Bat\_Retailer\_Recycle 后,由于分销商具有回收机制,故根据该参数判断此电池是新电池还是废弃的电池,从而决定进入回收中心还是继续配送给车辆。

2) 2nd\_Car\_Maker: 经过修复后再次进入到汽车供应商之中的电池。

3) 增长率为每个步长 41 块,电池生产商生产的电池按 1:2 的比例分别运往汽车制造商和分销

## ■ 模型参数设置 / Model Parameter Settings

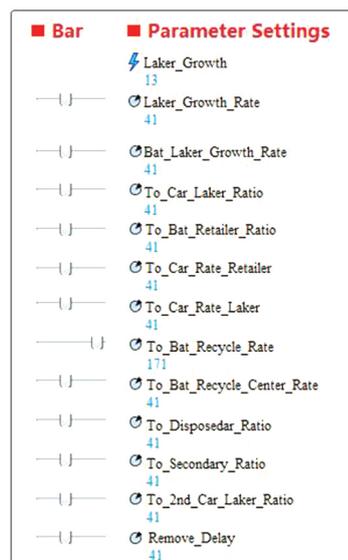


图 2 模型参数设置

Fig. 2 Setting model parameter

商处,回收中心的处理方式按 1:1:1 的比例将回收的电池分别送往汽车制造商、梯级利用企业以及报废拆解处理。

## 2.3 基于 AnyLogic 的电池回收模型仿真

模型构建基本思想为:电池生产商生产出来的电池一部分运往电动汽车生产商,一部分运往电池总经销商,然后通过各分销商零售商卖往全国各地的消费者。本模型中,假定一个步长模拟现实生活中的一周,模拟 10 年的时间共执行 520 步,其他的参数设置如 2.2 节所述。

设定电池有 8 个状态,每个模型运行过程中的状态在仿真二维图、三维图中都用不同的颜色显示,状态图中主要采用两种方式进行状态迁移的驱动:基于时间 Timeout(即到达一定时间后发生相应的状态转变)与基于速率 Ratio(即按一定速度发生状态变化),各个变量的取值由主界面中的对应参数配置根据现实数据确定,其初始值可通过调节 bar 区域中的滑块控件来进行设置,动力电池状态转换如图 3 所示。

模型设置一个动力电池智能体(H\_Battery),采用该智能体的状态变迁模拟单一动力电池的全生命周期变化情况,通过该智能体的数量变化分析规模化的动力电池发展与需求。系统主要包括以下状态:

1) In\_Bat\_Maker: 电池处于电池生产商的状态,蓝色;

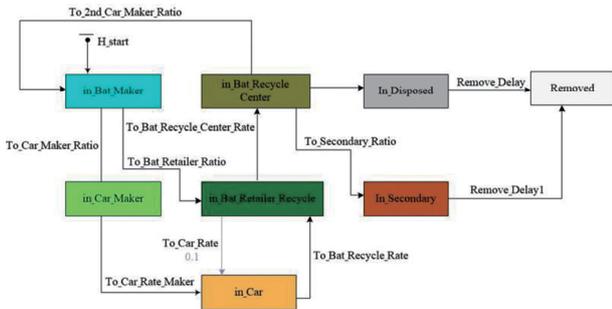


图3 动力电池的状态转换图

Fig. 3 The state transition diagram of power battery

- 2) In\_Car\_Maker: 电池处于电动汽车生产商的状态, 绿色;
- 3) In\_Car: 电池处于电动汽车的状态, 黄色;
- 4) In\_Bat\_Retailer\_Recycle: 电池处于电池分销商/回收商的状态, 深绿;
- 5) In\_Bat\_Recycle\_Center: 电池处于回收中心的状态, 深灰绿;
- 6) In\_Disposed: 电池处于被丢弃的状态, 深灰色;
- 7) In\_Secondary: 电池处于梯级利用状态, 砖红色;
- 8) Removed: 电池被移除模型, 即电池报废分解掉, 并对有用资源完成回收, 浅灰色。

每块动力电池在产生后, 都会有一个编码, 从 h\_Batteries [0] 开始编码, 想要查询电池某一时刻的状态, 可以在状态栏的 h\_Batteries [.] 后输入要查询的编码, 该电池对应的状态会在状态图中显示出来, 通过对电池编码实现从生产到回收全过程可追溯。

### 3 仿真结果分析

利用 AnyLogic 软件的智能体理论, 对所建立的回收路径网络模型在理想状态下进行仿真, 分析各主要指标的变化规律。

如图 4 所示, 该模型中电池应用途径的时间点包括 4 个阶段: 在模型建立的初期即前 3 年报废的电池、梯级利用的电池以及再次恢复使用的电池都较少, 回收效果不明显; 在模型实施的中期即在第 3~4 年回收再利用的电池数量急剧增加, 电池修复再利用、梯级利用、报废处理的电池量各占总量的约 1/3; 在第 4~7 年初期变化平缓, 之后回收增速加快; 在模型实施的后期即在第 7~10 年回收模型进

入稳定状态。

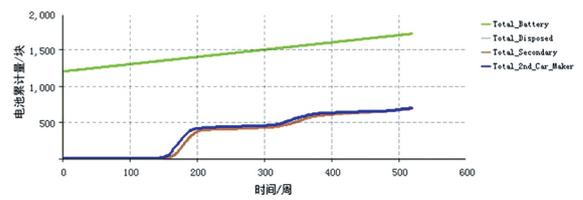


图4 电池应用途径时间点

Fig. 4 The time point of battery application

出现 4 个阶段的原因在于: 在前 3 年, 由于模型建立之初新电池的比例较大, 并没有形成有效的回收路径, 故回收效果不明显; 在第 3~4 年, 由于模型初期电池已到达规定的使用寿命(40 个月), 可以进行正规检测并合理分配流向, 以各 1/3 的比例流向报废、修复再利用、梯级利用三个途径; 在第 4~7 年, 由于新一轮电池循环开始, 初期变化平缓, 之后回收增速加快; 在第 7~10 年, 由于进入恢复翻新过程的电池比例增多, 电池生产企业生产新电池的量相应减少, 从而使电池总量的增速相对平稳, 但总电池的供应量仍能满足目前的市场需求, 说明回收模型实施效果比较好。

### 4 结论

本文建立电动汽车锂电池回收模型, 应用 Any-Logic 软件智能体理论在理想状况下对模型进行仿真, 结论如下:

- 1) 该模型在相关政策与技术支持下, 基于生产者责任制, 通过各经销商和龙头生产企业联合建立回收中心, 符合基于生产者责任延伸制度的“污染付费”原则, 也有构建全国性回收网络的能力。
- 2) 相关部门对所构建的网络的各个环节提出政策建议, 明确各个主体的责任, 为电动汽车锂电池实现良好的回收利用提供技术支撑。
- 3) 建立以互联网+技术+服务的网络模型, 对电池实行编码制度, 且在互联网平台上实时记录并可以查询电池从生产、使用、回收、再利用、报废的整个生命全周期的过程。
- 4) 运用 AnyLogic 对电池全生命周期进行仿真, 结果表明建立的回收模型能够使循环使用的电池大幅增加, 显著减少新电池投入使用和废旧电池产生, 实现了电动汽车废旧电池良好的回收利用。

(下转第 34 页)

- based image query system[C]//Proceedings of the fourth ACM international conference on Multimedia. ACM, 1997: 87-98.
- [7] CARSON C, THOMAS M, BELONGIE S, et al. Bloworld: a system for region-based image indexing and retrieval[C]//Proc. Visual Information System, 1999: 509-516.
- [8] 张丽. 基于颜色和纹理特征的图像检索技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.
- [9] 丁军娣, 董燕, 卢卫东. 基于角点特征的图像检索新方法[J]. 计算机应用与软件, 2015, 2(3): 212-214.
- [10] 周东尧, 伍岳庆, 姚宇. 基于全局特征和尺度不变特征转换特征融合的医学图像检索[J]. 计算机应用, 2015, 35(4): 1097-1100, 1105.
- [11] GUANGHAI LIU, JINGYU YANG. Content-based image retrieval using color difference histogram[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(1): 188-198.
- [12] LEE K, LEE C. Content-based image retrieval using LBP and HSV color histogram[J]. Journal of Broadcast Engineering, 2013, 18(3): 372-379.
- [13] 宋克臣, 颜云辉, 陈文辉, 等. 局部二值模式方法研究与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 730-744.
- [14] 张洁玉, 武小川. 加权局部二值模式的人脸特征提取[J]. 中国图像图形学报, 2014, 19(12): 1794-1801.
- [15] 李海峰, 卢燕飞. Harris角点检测在彩色图像中的应用[J]. 北京电子科技学院学报, 2009, 17(2): 7-11.
- [16] 张鸿锋, 李婉琪, 曾昭君, 等. Hu不变矩在图像识别中的应用与实现[J]. 科技资讯, 2014, 30: 5-8.
- [17] LIU L, YANG L, WANG Y, et al. Combining gray-level co-occurrence matrix and statistics features for rotation invariant texture classification in wavelet domain[J]. International Congress on Image & Signal Processing, 2015: 539-543.
- [18] YANSU HU, ZHIJUN WANG, XIAOGUANG FAN, et al. Material microstructures analyzed by using gray level co-occurrence matrices[J]. Chin Phys B, 2017, 26(9): 098104-1-8.
- [19] 王春静, 许圣梅. 基于内容的图像检索的相似度测量方法[J]. Data Acquisition and Processing, 2017, 32(1): 104-111.

(编辑: 杜清玲)

(上接第28页)

## 参考文献:

- [1] 中国汽车技术研究中心, 日产(中国)投资有限公司, 东风汽车有限公司. 中国新能源汽车产业发展报告(2015) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
- [2] 杨见青, 关杰, 梁波, 等. 我国废弃磷酸铁锂电池的资源化研究[J]. 环境工程, 2017, 35(2): 127-132.
- [3] 拜冰阳, 李艳萍, 扈学文, 等. 关于废铅蓄电池回收、利用的管理问题分析和政策建议[J]. 环境保护, 2015, 43(24): 65-69.
- [4] 节能与综合利用司. 关于《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》的解读[Z]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2018.
- [5] MICHAEL J. Recycling of lithium ion cells and batteries[J]. Journal of Power Sources, 2001, 197-198: 736-738.
- [6] KUSHNIR D, SANDEN B A. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles[J]. Resources Policy, 2012, 37(1): 93-103.
- [7] SCROSATI B, GARCHE J. Lithium batteries: status, prospects and future[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2419-2430.
- [8] 余海军, 张铜柱, 刘媛, 等. 车用动力电池回收拆解的安全与环境技术[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(3): 77-79, 92.
- [9] 王军. 铅酸蓄电池回收再生产业善治路径选择[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2015, 25(6): 22-28.

(编辑: 杜清玲)