

# 基于 LCA 的典型 3C 家用电器产品碳足迹研究

张子华,董延硕,彭瑶,禹桐,杨雪,杜新月

(北京工业大学 材料与制造学部现代机械设计研究所,北京 100124)

**摘要:**基于生命周期评价(LCA)的方法,对一台典型工业产品——扫地机器人,进行了全生命周期中的温室气体(GHG)排放量化研究。包括整个生命周期内的全部碳排放,即从原材料、生产制造、运输、使用到最后的处置及再生利用 5 个阶段的碳排放量化研究。结合具体产品的设计流程,计划课题拟开展 3 个方面的研究工作:① 建立扫地机器人产品全生命周期框架;② 确定扫地机器人的碳足迹系统边界及核算内容;③ 清单分析,对扫地机器人进行碳排放量化分析。结果表明:在扫地机器人的整个生命周期中,制造加工阶段产生的碳排放最多,对扫地机器人进行设计优化时应重点关注制造加工阶段的减碳策略研究。

**关键词:**碳排放;生命周期评价;系统边界;扫地机器人

中图分类号:TS273

文献标识码:A

文章编号:1674-9944(2022)22-0199-07

DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2022.22.039

## Research on Carbon Footprint of Typical 3C Household Appliances Based on Lifecycle Assessment

Zhang Zihua, Dong Yanshuo, Peng Yao, Yu Tong, Yang Xue, Du Xinyue

(Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the method of lifecycle assessment (LCA), this paper studies the greenhouse gas (GHG) emission in the whole life cycle of a typical industrial product—sweeping robot. This includes all carbon emissions in the whole life cycle, that is, the research on carbon emissions from five stages: raw materials, manufacturing, transportation, use to final disposal and recycling. Combined with the design process of specific products, this project plans to carry out research work in three aspects: ①The whole life cycle framework of sweeping robot products is established; ②The boundary and accounting content of the carbon footprint system of the sweeping robot are determined; ③Inventory is analyzed and the carbon emission of the sweeping robot is quantitatively analyzed. The results show that in the whole life cycle of the sweeping robot, the manufacturing and processing stage produces the most carbon emissions, so the research of carbon reduction strategy should be focused in the manufacturing and processing stage when optimizing the design of the sweeping robot.

**Key words:** carbon dioxide emission; lifecycle assessment; system boundary; sweeping robot

## 1 引言

2020 年第七十五届联合国大会上,我国向国际社会庄严承诺 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和(即“3060 双碳目标”),首次明确了实现碳达峰、碳中和的决心,是迄今为止在国际范围内减排承诺力度最大、面临挑战最艰巨且时间最紧迫的国家之

一,彰显了对全球可持续发展的责任和担当<sup>[1]</sup>。中国碳排放量占全球总量约 30%,年平均增速大于世界平均水平。相比欧美国家 40~70 年的窗口,中国作为发展中国家需要在 30 年内由“碳达峰”走向“碳中和”。在未来“双碳”规划中必须走出具有“中国特色”的减排路径,在保障经济可持续发展的基础上逐步实现碳达峰、碳中和。就碳排放结构而言,中国的碳排

收稿日期:2022-10-10

基金项目:北京市博士后工作经费资助项目(编号:2021-ZZ-056);朝阳区博士后工作经费资助项目(编号:Q1001025202201);北京工业大学“星火基金”重点计划项目(编号:XH-2022-03-51,XH-2022-03-21)

作者简介:张子华(1990-),男,博士后,讲师,研究方向为绿色、低碳、可持续设计与制造。

放主要集中于工业(41%)及能源(46%)。工业是二氧化碳排放的主要领域,工业绿色低碳改造,是做好碳达峰、碳中和的关键。目前国内外关于家用电器碳足迹的研究主要聚焦于碳足迹评价技术和计算方法,缺少对家用电器全生命周期碳足迹量化的研究。

王吉凯等<sup>[2]</sup>对家电低碳评价技术内容进行了详细的阐释,并结合对家用豆浆机的碳足迹计算和评价,对家电低碳评价技术方案进行了应用分析。俞波等<sup>[3]</sup>对碳足迹评价的国内外标准、主要步骤以及技术难点进行了研究和分析,为电子电器企业以及相关技术监测机构计算分析产品碳足迹提供了参考。赵新等<sup>[4]</sup>介绍了碳排放绩效指标和一种碳足迹计算方法,并开发了一种软件,可对家电产品进行碳排放绩效评价和碳足迹计算,并以液晶电视机为例,对所提方法进行了应用分析。鲍宏等<sup>[5]</sup>首次提出了产品多层次碳足迹分析方法,构建了产品多层次碳足迹分析模型,并以洗碗机为例,验证了所提方法的可行性。陈艳阳等<sup>[6]</sup>对叶轮机加工车间多目标生产调度开展了研究,基于车间碳排放源建立了碳排放量化数学模型,并基于碳足迹、完工时间、设备运行成本3个约束条件完成了生产调度方案设计,提高了设备利用率。Ghani等<sup>[7]</sup>采用全生命周期评价法(Life Cycle Assessment;LCA)对马来西亚吉兰丹州 Senok 的海水淡化厂的海水生产系统进行了碳足迹评估。张旭靖等<sup>[8]</sup>通过生命周期评价法建立服装缝制生产过程碳排放评估模型,以碳排放最少和生产线面积最小为目标建立布局多目标优化模型,采用NSGA-II算法求解最优布局解。Piroozfard等<sup>[9]</sup>以碳排放和总延迟为目标进行柔性生产作业调度,并建立了生产车间的设备碳排放数学模型。周先锋等<sup>[10]</sup>针对工厂化食用菌生产过程中的能量流进行建模,实现对生产过程中各工艺环节能耗的定量分析。Sweetapple等<sup>[11]</sup>采用NSGA-II多目标优化算法求解废水处理厂的帕累托最优解,其最优解涵盖了最小化温室气体排放、操作成本、污染物的浓度以及符合法律约束。邓朝晖等<sup>[12]</sup>将机床零部件生产过程分为生产加工、使用、回收处理、运输等4个阶段,并分别对其建立碳排放模型,为生产环节各个阶段实施节能减排提供指导。

而针对产品的研究,本课题的研究以一台具体产品作为研究对象。目前,家务机器人发展速度较快,在个人及家庭服务机器人的销售量中占据主要部分,而家务机器人的发展主要得益于扫地机器人市场的崛起。据中商产业研究院发布的《2018—2023年全球机器人行业发展前景及投资机会研究报告》<sup>[13]</sup>数据显示,2015年全球个人及家用服务机器人销售量为540万台,其中家务服务机器人370万台,占比将近70%。扫地机器人是目前家务机器人中的主导品

类,2021年一季度,扫地机器人销售额达18.59亿元、销售量97.14万台,同比分别增长30.08%、4.01%,产品均价1914元,同比上涨384元<sup>[14]</sup>。扫地机器人产品在现代生活中扮演着越来越重要的角色,发展速度加速提升。

鉴于扫地机器人在家用机器人中的市场份额,本课题将基于生命周期评价(LCA)的方法,以具体的机电产品扫地机器人为例进行碳足迹量化评估。本课题基于LCA方法,参考已有《PAS 2050:2011》<sup>[15]</sup>等准则体系,结合具体产品的设计流程,依照3个步骤进行研究:①建立产品研究全生命周期框架;②确定系统边界及核算内容;③碳足迹清单分析。清单分析中需要建立具体的碳足迹量化模型,包括整个生命周期内的各种GHG排放,即从原材料、生产制造、运输、使用到最后的处置及再生利用5个阶段的GHG排放量化研究。

## 2 扫地机器人全生命周期碳排放计算方法

### 2.1 系统边界的确定

在本文研究过程中,选取的功能单元为一台扫地机器人(以科沃斯品牌T9型号为例),将扫地机器人的生命周期分为5个阶段,分别为:原材料阶段、制造阶段、运输阶段、使用阶段、回收阶段,建立起基于时间轴和物质轴的时空网络模型,如图1所示。首先建立碳足迹量化模型,为其他同类型3C家电产品碳足迹分析做好规范,然后在具体阶段对其进行碳排放量化分析。

### 2.2 碳排放核算模型

目前已知的碳排放量化方法有碳排放因子法、质量平衡法和实际测量法<sup>[16]</sup>。考虑到扫地机器人的生命周期过程复杂,且不易被测量,因此采用碳排放因子法。碳排放因子,即碳排放系数,是指每一种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放数量,根据IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)的假定,可以认为某种能源的碳排放系数是固定不变的,碳排放系数通常是指二氧化碳的排放系数,甲烷、氧化亚氮、全氟化物、六氟化硫等其他温室气体,一般折算成二氧化碳后再参与计算,折合后被称之为二氧化碳当量。碳排放因子法如式(1)所示:

$$E=AD \times EF \quad (1)$$

式(1)中, $E$ 为碳排放量; $AD$ 为核算期内生产过程中化石燃料的消耗量、原材料的使用量及购入或输出的电量; $EF$ 为碳排放因子,即碳排放系数,可由碳审计工具箱获取数据。

#### 2.2.1 原材料使用阶段

生产一台扫地机器人需要用到大量的零部件,在

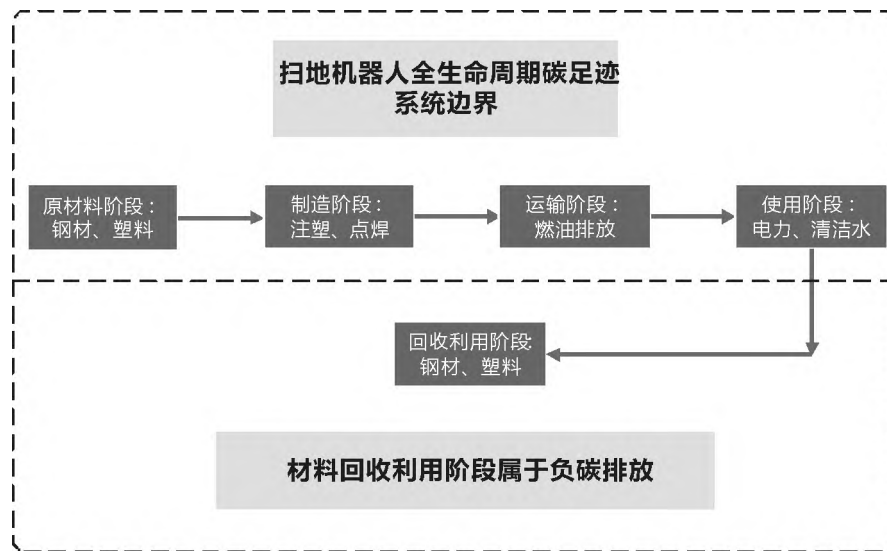


图 1 扫地机器人碳足迹系统边界分析

零部件的原材料使用阶段会产生大量的碳排放,为计算原材料使用阶段的碳排放,笔者引用了科沃斯品牌网站公布的扫地机器人零部件各类物质材料的质量以及材质。需要注意的是原材料在使用过程中会出现损耗,在计算碳排放时应将损耗率考虑进去。将零部件中所包含的各类物质材料的质量与相应的物质排放因子相乘,再乘以相应物质损耗率,所得总和即为该阶段碳排放估算值,如式(2)所示:

$$G_{\text{material}} = \sum_{i=1}^n (M_i \times EF_i \times k) \quad (2)$$

式(2)中,  $G_{\text{material}}$  为原料获取阶段 GHG 排放量,  $\text{kgCO}_2\text{e}$ ;  $M_i$  为零部件中所包含的第  $i$  类物质材料的质量,  $\text{kg}$ ;  $EF_i$  为第  $i$  类物质排放因子,  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ ;  $k$  为材料的损耗率。

### 2.2.2 制造加工阶段

在扫地机器人制造加工过程中,一些具体的工艺制造环节会产生碳排放,主要涉及外壳开模注塑和主机机体点焊工艺环节,以其为例来计算制造加工阶段的碳排放。此两个工艺环节的碳排放主要来源于注塑机和电焊机焊枪的电力消耗,其他来源影响较小。计算公式如下。

(1) 外壳——开模注塑:

$$G_{\text{注塑}} = P_{\text{注塑}} \times T \times EF_{\text{elc}} \quad (3)$$

式(3)中,  $G_{\text{注塑}}$  为注塑阶段 GHG 排放量,  $\text{kgCO}_2\text{e}$ ;  $P_{\text{注塑}}$  为注塑机功率;  $T$  为注塑时间;  $EF_{\text{elc}}$  为耗电过程中电力排放因子,  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ 。

(2) 主机——点焊:

$$G_{\text{welding}} = I^2 R t_{\text{焊}} \times N \times EF_{\text{elc}} \quad (4)$$

$$N = \frac{L}{d} + 1 \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $G_{\text{welding}}$  为点焊阶段 GHG 排放量,  $\text{kgCO}_2\text{e}$ ;  $I^2 R t_{\text{焊}}$  为电能;  $EF_{\text{elc}}$  为电力排放因子,

$\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ ;  $N$  为点数 = 长度/间隔 + 1。

### 2.2.3 运输阶段

运输阶段的排放主要是对加工产品的运输,其主要运输方式分别为海路运输和公路运输,运输阶段碳足迹主要是运输工具等设备化石燃料燃烧产生的碳排放,涉及的能源主要有柴油、汽油、航空煤油等。因此,依据运输扫地机器人货船的发动机功率和发动机的燃油消耗率以及货船的行驶时间等参数,即可算出相应的燃油消耗量。公路运输则是根据货车的发动机功率和发动机的燃油消耗率以及货车行驶时间,计算对应的燃油消耗量。海运货船与公路运输的货车都主要以柴油为主。将燃油消耗量与其相对应的碳排放因子相乘,得到该阶段的碳排放量计算值,如式(6)、(7)所示:

$$x_{\text{fuel}-j} = P_e \times \eta \times T \quad (6)$$

$$E_{\text{GHG}-i, \text{fuel}-j} = x_{\text{fuel}-j} \times EF_{\text{GHG}-i, \text{fuel}-j} \quad (7)$$

式(6)、(7)中,  $x_{\text{fuel}-j}$  为燃料消耗量;  $P_e$  为特定发动机的额定功率;  $\eta$  为特定发动机燃油消耗率;  $T$  为特定发动机运行时间;  $E_{\text{GHG}-i, \text{fuel}-j}$  为  $j$  燃料燃烧产生的温室气体碳排放量;  $EF_{\text{GHG}-i, \text{fuel}-j}$  为燃烧特定燃料  $j$  的碳排放系数。

### 2.2.4 使用阶段

在使用阶段,扫地机器人的碳排放主要来自拖地水的消耗以及电能的使用。扫地机器人每一次充电都会产生碳排放,故可以根据其充电的频率以及使用寿命来确定其充电次数,再根据电耗的碳排放是所消耗的电能与对应地区的电力碳排放因子<sup>[17]</sup>乘积而得,所消耗电能可以采用产品充电功率  $P$  与单次充电时间  $T$  的乘积。最终使用阶段全生命周期对电能的利用为充电一次所消耗的电能与充电次数的乘积。扫地机器人每一次运行都会消耗水用来清洁地面,确定其充电一次运行后所需水量与水的碳排放因

子<sup>[18]</sup>,最终使用阶段水的碳排放为用水量与水的碳排放因子的乘积。使用阶段的所有碳排放为两方面之和,如式(8)、(9)所示:

$$G_{use-ec} = P \times t \times EF_{ec} \times N \tag{8}$$

$$G_{use-water} = M \times EF_{water} \times N \tag{9}$$

式(8)、(9)中, $G_{use-ec}$ 为使用阶段电能的碳排放量; $G_{use-water}$ 为使用阶段清洁用水的碳排放量; $P$ 为科沃斯扫地机器人充电额定功率; $t$ 为充电时间; $M$ 为单次清洁用水量; $N$ 为充电/充水次数。

2.2.5 回收阶段

由于扫地机器人生产过程的原材料主要为不锈钢材骨架和塑料包壳,因此回收阶段主要回收原材料的材质为不锈钢和塑料,其他材料忽略不计。

(1)回收不锈钢材料。通过查询,回收钢铁主要有直接通空气法和直接通氯气氧化法<sup>[19]</sup>,但氯气毒性大且污染环境,价格较高。而空气取之不尽用之不竭,因此通空气法较为优越。

(2)回收塑料材料。废旧塑料分离方法主要为人工分离、密度分离、光学分离、静电分离、熔点分离、溶解分离等。为了操作简单采用密度分离法<sup>[20]</sup>。

回收得到的碳排放均可用以下公式求解,如式(10)所示:

$$E_{CO_2-eq,waste-j} = \sum_j (m_{waste-j} \times EF_{CO_2-eq,waste-j}) \tag{10}$$

表 1 科沃斯 DEEBOT T9 系列机器人主要原材料材质及质量

| 零部件     | 原材料 | 质量/g   | 零部件        | 原材料   | 质量/g |
|---------|-----|--------|------------|-------|------|
| 电池后盖    | ABS | 10.3   | 驱动模块弹簧     | Steel | 1    |
| 清洁刷     | ABS | 31.8   | 防撞架弹簧      | Steel | 0.5  |
| 储尘室盖板   | ABS | 74.8   | 主机体螺丝      | Steel | 11.6 |
| (下)防撞板  | ABS | 35.2   | (下)防撞板螺丝   | Steel | 6    |
| 驱动模块盖板  | ABS | 15.8   | 驱动模块盖板螺丝   | Steel | 3.8  |
| (上)防撞板  | ABS | 42.7   | 电池盒内固定螺丝   | Steel | 0.3  |
| 防撞架     | ABS | 24.3   | (上)防撞板螺丝   | Steel | 2.6  |
| 万向轮及支架  | ABS | 5.2    | 主控印刷电路板螺丝  | Steel | 6    |
| 主机外壳(下) | ABS | 404.3  | 清洁刷模块螺丝    | Steel | 24.6 |
| 主机外壳(下) | ABS | 383.3  | 防撞架螺丝及垫片   | Steel | 4.4  |
| 除尘纸座    | ABS | 50.1   | 万向轮螺丝及垫片   | Steel | 1.1  |
| 总计      | ABS | 1077.8 | 传感器印刷电路板螺丝 | Steel | 11.4 |
|         |     |        | 吸尘器模块螺丝    | Steel | 11.6 |
|         |     |        | 吸尘器模块螺丝    | Steel | 11.6 |
|         |     |        | 总计         | Steel | 96.5 |

(2)扫地机器人加工制造阶段,以常州北奇注塑机 158 型卧式曲肘注塑机与无锡尼克 4200W 超声波塑料焊接机为例,确定注塑机与焊接机功率以及工作时间,得出以下数值,参见表 2。

表 2 注塑机与焊接机功率及单次工作时长

| 名称  | 功率/W  | 时间/s |
|-----|-------|------|
| 注塑机 | 13000 | 5    |
| 焊接机 | 4200  | 1    |

式(10)中, $m_{waste-j}$ 为已弃置的第  $j$  类废物的质量; $EF_{CO_2-eq,waste-j}$ 为已弃置的第  $j$  类废物的质量相应的排放系数。

3 科沃斯扫地机器人全生命周期碳排放量化计算

3.1 数据获取与处理

(1)以科沃斯 DEEBOT T9 型号扫地机器人为例,如图 2 所示,计算其各个零部件的原材料材质以及质量。由于原材料主要材质为 ABS 和 Steel,其他材质原材料的碳排放可以忽略不计,整理后如表 1 所示<sup>[13]</sup>。



图 2 科沃斯 DEEBOT T9 型号扫地机器  
(图片来自科沃斯官网)

(3)由扫地机器人全生命周期碳排放核算方法可知,对扫地机器人运输过程中的碳排放核算需要先获取柴油、发动机功率、燃油效率等数据。本文研究案例为国内扫地机器人的生产、运输及使用过程,故只涉及陆路碳排放计算。

首先确定发动机功率以及柴油消耗率、货物承载量。本文以一台搭载玉柴 YC6L 系列发动机的中型货车为例,扫地机器人从江苏苏州运往北京,计算其相关参数。按照实际货运得到以下数据,参见表 3。

表 3 直接排放数值

| 类型 | 发动机功率/kW | 柴油消耗率/[g/(kW·h)] | 行驶距离/km | 行驶时间/h | 货车承载量/t |
|----|----------|------------------|---------|--------|---------|
| 数值 | 206      | ≤193             | 1191    | 15.5   | 5       |

确定直接排放中燃油密度、燃油碳排放系数、水、电的碳排放因子,参见表 4。

表 4 直接排放碳排放系数与柴油密度

| 类型 | 柴油密度<br>/(kg/L) | 柴油碳排放系数<br>/(kg/L) | 电碳排放因子<br>/[kgCO <sub>2</sub> e/(kW·h)] | 水碳排放因子<br>/(kgCO <sub>2</sub> e/t) | 来源           |
|----|-----------------|--------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| 数值 | 0.84            | 2.63               | 0.96                                    | 0.194                              | 香港中小企业碳审计工具箱 |

(4)扫地机器人使用阶段需要确定 T9 系列科沃斯扫地机器人的重量、额定功率、充电时间、使用寿命以及电力碳排放因子<sup>[16]</sup>,经查询科沃斯 DEEBOT T9

系列说明书<sup>[21]</sup>与科沃斯官网<sup>[22]</sup>,得到以下数据,参见表 5。

表 5 科沃斯 DEEBOT T9 系列扫地机器人的相关排放计算参数

| 类型 | 重量/kg | 额定功率/W | 充电时间/h | 水箱容积/L | 使用寿命/a |
|----|-------|--------|--------|--------|--------|
| 数量 | 4.7   | 20     | 6.5    | 0.24   | 6      |

### 3.2 直接碳排放计算

#### 3.2.1 原材料阶段碳排放

将扫地机器人零部件中所包含的各类物质材料的质量与相应的物质排放因子相乘,相加的总和即为该阶段碳排放估算值(表 6)。

表 6 科沃斯 DEEBOT T9 系列机器人主要原材料碳排放因子

| 原材料   | CO <sub>2</sub> 排放因子<br>/(gCO <sub>2</sub> /g) | 来源                                                                   |
|-------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| ABS   | 0.19                                           | 香港中小企业碳审计工具箱                                                         |
| Steel | 2.50                                           | Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories |

将公式(1)代入数据得: $G_{\text{material}}=0.19 \times 1077.8 + 2.5 \times 96.5 = 0.446 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

科沃斯 DEEBOT T9 扫地机器人零部件中原材料阶段碳排放量化值为 0.446 kg 二氧化碳当量。

#### 3.2.2 生产加工制造阶段计算

已知注塑机功率为 13 kW,注塑一台扫地机器人大约需要 5 s,则注塑一台扫地机器人产生的碳排放为注塑机功率乘以注塑时间和对应地区的电力碳排放因子得到,代入公式(3)可得: $G_{\text{注塑}}=13000 \times 5 \times 0.96 = 62.4 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

已知焊接机功率为 4200 W,焊接一台扫地机器人大约需要 1 s,总计点焊 5 次,则焊接一台扫地机器人产生的碳排放为焊接机功率乘以焊接时间,和对应地区的电力碳排放因子得到,代入公式(4)得: $G_{\text{welding}}=4200 \times 1 \times 0.96 \times 5 = 20.16 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

科沃斯 DEEBOT T9 扫地机器人在其生产加工制造阶段碳排放量化值为 82.56 kg 二氧化碳当量。

#### 3.2.3 运输阶段碳排放量计算

玉柴 YC6L 系列发动机功率为 206 kW,燃油消耗率为 193 g/(kW·h),行驶时间为 15.5 h,根据式(1)、(2)计算可得柴油消耗量  $X$  与运输阶段碳排放量  $E$ 。代入公式得: $X=206 \times 193 \times 15.5 = 616.249 \text{ kg}$ ;  $E=616.249 \times 2.635/0.84 = 1933.114 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

再根据货车运货量 5 t 与扫地机器人重 4.7 kg 可以计算单位扫地机器人的碳排放,可以由运输工具载货量和单位产品质量间接获得。平均到一台扫地机器人上的碳排放计算公式: $E_1 = E(\text{总}) \times 4.7/M$  (货物总质量)。

代入公式得: $E_1 = 1933.114 \times 4.7/5000 = 1.817 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

运输阶段的排放主要是对加工产品的运输,本文以一台搭载玉柴 YC6L 系列发动机的中型货车为例,将科沃斯 DEEBOT T9 扫地机器人从江苏苏州运往北京,计算了燃油消耗量以及对应的碳排放量为 1.817 kg 二氧化碳当量。

#### 3.2.4 使用阶段碳排放量计算

调研家庭中对扫地机器人的使用频率,以北京普通四口之家扫地机器人每周平均充电 3 次(每月充电 12 次),每次充电补充一次水箱的使用场景为例。已知扫地机器人额定充电功率为 20 W,充电时间为 6.5 h,碳排放可由所消耗的电能与对应地区的电力碳排放因子乘积得到,即根据式(8)可计算电耗的碳排放: $G_{\text{use-elc}}=107.827 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。已知扫地机器人使用寿命为 6 年,水箱容量为 0.24 L,根据式(9)可计算水的碳排放: $G_{\text{use-water}}=40.228 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

扫地机器人使用阶段的碳排放主要是电力消耗和清洁用水,由调研计算可知,扫地机器人使用阶段

全生命周期总计消耗电能  $112.32 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 总计用水量为  $207.36 \text{ L}$ , 扫地机器人使用阶段对应的碳排放量为  $148.055 \text{ kg}$  二氧化碳当量。

### 3.2.5 回收利用阶段

(1) 钢材的回收。直接通空气法最高转化率约为  $93\%$ <sup>[7]</sup>, 由表1与表5可知, 生产过程中使用的钢铁原材料质量为  $96.5 \text{ g}$ , 碳排放因子为  $2.5 \text{ gCO}_2/\text{g}$ , 由公式(10)计算可得:  $G_{\text{steel-recycle}} = 2.5 \times 96.5 \times 0.93 = 0.224 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

(2) 塑料的回收。密度分离法转化率约为  $98\%$ <sup>[8]</sup>, 由表1与表5可知, 塑料的质量为  $1077.8 \text{ g}$ , 碳排放因子为  $0.19 \text{ gCO}_2/\text{g}$ , 由公式(10)得:  $G_{\text{ABS-recycle}} = 1077.8 \times 0.19 \times 0.98 = 0.201 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

则回收阶段总共回收材料质量为:  $G_{\text{recycle}} = G_{\text{steel}} + G_{\text{ABS}} = 0.425 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

### 3.3 扫地机器人全生命周期碳足迹核算

通过对某型科沃斯扫地机器人全生命周期各阶段的碳排放量化计算, 得出了一台扫地机器人全生命周期碳排放量为:

$$E = G_{\text{material}} + G_{\text{注塑}} + G_{\text{welding}} + E_1 + G_{\text{use-elc}} + G_{\text{use-water}} - G_{\text{recycle}} = 232.453 \text{ kgCO}_2\text{e}。$$

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本文基于生命周期评价原理, 采用排放因子法研究了一台扫地机器人的碳排放足迹。一台扫地机器人生命周期碳排放源主要来自原材料阶段、制造加工阶段、运输阶段、使用和废弃物回收阶段。以科沃斯扫地机器人为例, 介绍了3C白色家电产品全生命周期分析的系统边界, 并给出各阶段碳足迹核算模型, 对于家电类产品全生命周期碳足迹量化研究提供了重要参考依据。结果表明, 在扫地机器人生命周期碳足迹中, 使用阶段产生的碳排放最多为  $148.055 \text{ kgCO}_2\text{e}$ , 其次是制造加工阶段为  $82.56 \text{ kg}$  二氧化碳当量, 由此可知3C白色家电产品全生命周期产生的碳排放由家电生产企业及相关参与主体共同产生。

### 4.2 展望

本文在碳足迹核算的方法和实践上仍然存在一些问题, 今后可就以下内容做进一步研究。

(1) 方法方面, 生命周期碳排放核算分析存在边界问题, 同时所需的人力、物力资源较多。未来可采用其他方法进行碳足迹核算分析, 对比不同方法下的碳足迹研究, 整合不同方法的优点, 对碳足迹核算进行进一步优化。

(2) 数据方面, 本文只研究了扫地机器人生命周期中主要的碳排放来源, 对于一些难于计算且影响微不足道的部分不作考虑。未来可对该部分进行进一

步研究, 考虑各种情况下的复杂因素, 核算复杂情况下的碳排放, 对数据进行进一步优化。

(3) 不确定性方面, 由于方法和数据源方面的原因, 没有研究对核算结果进行不确定分析。未来可就估算和降低碳足迹核算结果的不确定性进行研究。

### 参考文献:

- [1] 胡 喆. 科技部等九部门印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》[J]. 绿色科技, 2022, 24(16).
- [2] 王吉凯, 赵 新, 何丽娇, 等. 家电产品低碳评价技术研究[J]. 日用电器, 2011(1):12—15.
- [3] 俞 波, 侯 坚. 电子电器产品碳足迹评价技术解析[J]. 质量与认证, 2021(S1):164—167.
- [4] 赵 新, 万 超, 符永高, 等. 基于碳排放绩效指标的家电产品碳足迹分析[J]. 日用电器, 2014(12):75—79.
- [5] 鲍 宏, 刘光复, 王吉凯. 面向低碳设计的产品多层次碳足迹分析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1):21—28.
- [6] 陈艳阳. 基于碳排放的多目标车间生产调度研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [7] Ghani L A, Ali N, Nazaran I S, et al. Carbon Footprint—Energy Detection for Desalination Small Plant Adaptation Response[J]. Energies, 2021, 14(21).
- [8] Zhang X, Wang L, Chen Y. Carbon Emission Reduction of Apparel Material Distribution Based on Multi-Objective Genetic Algorithm (NSGA-II)[J]. Sustainability, 2019, 11(9):2571—2586.
- [9] Piroozfard H, Wong K Y, Wong W P. Minimizing total carbon footprint and total late work criterion in flexible job shop scheduling by using an improved multi-objective genetic algorithm[J]. Resources Conservation and Recycling, 2018, 128:267—283.
- [10] 周先锋. 食用菌工厂能量流建模与低碳生产管理研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [11] Sweetapple C, Fu G, Butler D. Multi-objective optimisation of wastewater treatment plant control to reduce greenhouse gas emissions[J]. Water Research, 2014, 55:52—62.
- [12] 邓朝晖, 吕黎曙, 符亚辉, 等. 机床零部件生命周期碳排放评估与减排策略研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11):144—156.
- [13] 博思数据研究中心. 2018—2023年中国智能机器人市场深度调研与投资前景研究报告[EB/OL]. (2018-07-26)[2022-10-06]. <http://www.bosidata.com/report/M46510LW67.html>.
- [14] 产业发展研究网. 2017年中国扫地机器人市场发展状况分析[EB/OL]. (2018-02-27)[2022-10-06]. <http://www.chinaindr.com/tradenews/2018-02/118073.html>. from=singlemesage.
- [15] 360文库. 2011年11月PAS2050(2011)[EB/OL]. (2011-11-11)[2022-10-06]. <https://wenku.so.com/d/b77e0cdac5d1f5c9fcdc7e39f3f94bbd>.
- [16] 北极星大气网. 2021年7月碳中和专题 | 探索碳核算概念、方法与体系[EB/OL]. (2021-07-06)[2022-10-06]. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210706/1162291.shtml>.
- [17] 原创力文档网. 2012年1月中国LCA基础数据库—CLCD[EB/OL]. (2021-07-06)[2017-03-31]. <https://max.book118.com/html/2017/0330/98072947.shtml>.

(下转第209页)

对称等臂伸缩振动。 $\text{FeSi}_3$  团簇频率为  $382\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于 2 个 Si 原子的摇摆剪切振动, 频率为  $485\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于 2 个 Si 原子的对称摇摆振动以及 Fe 原子和其中 1 个 Si 原子的对称伸缩振动。 $\text{FeSi}_4$  团簇频率为  $271\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于 Fe 原子相对其余 4 个 Si 原子的伸缩振动, 频率为  $321\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于与 Fe 原子相连的 2 个 Si 原子之间的对称伸缩振动。 $\text{FeSi}_5$  团簇频率为  $221\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于与 Fe 原子相连的 4 个 Si 原子之间的对称伸缩振动, 频率为  $354\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于 Fe 原子以及四棱锥顶端 Si 原子之间的对称伸缩振动。 $\text{FeSi}_6$  团簇频率为  $469\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于与 Fe 原子相连的 2 个 Si 原子之间的对称伸缩振动以及远端 Si 原子的伸缩振动。 $\text{FeSi}_7$  团簇频率为  $87\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于 Fe 原子和与其相连的 1 个 Si 原子的伸缩振动和整个骨架的摇摆振动, 频率为  $164\text{ cm}^{-1}$  的峰值来源于整个骨架的摇摆振动。 $\text{FeSi}_8$  团簇频率为  $245\text{ cm}^{-1}$  及  $351\text{ cm}^{-1}$  的峰值均来自整个结构骨架的摇摆振动, 跟  $\text{TiSi}_7$  团簇  $\text{TiSi}_8$  团簇最强振动峰的归属一致<sup>[23]</sup>。整体来看,  $\text{FeSi}_n$  ( $n=1-8$ ) 团簇的红外光谱摩尔吸光系数随硅原子数目的增加而波动性增大,  $\text{FeSi}$  的最大摩尔吸光系数为  $7.025\text{ M}^{-1}\text{ cm}^{-1}$ , 增至  $\text{FeSi}_8$  的最大摩尔吸光系数  $49.210\text{ M}^{-1}\text{ cm}^{-1}$ , 其中  $\text{FeSi}_n$  ( $n=2-7$ ) 团簇的最大摩尔吸光系数介于 2 个值之间呈波动性增大。

## 4 结论与展望

本次研究得到, 在  $\text{FeSi}_n$  ( $n=1-8$ ) 团簇中的其掺杂 Fe 原子依次吸附在团簇的棱、面及微型开放笼型结构的内部; Humo-Lumo 能级演化规律显示,  $\text{FeSi}_3$  和  $\text{FeSi}_6$  团簇较相邻团簇具有较高的稳定性, 与此前的研究结论相差大, 是否由于本次使用 Gaussian16 与此前的 Gaussian03 计算软件包的版本不同导致的计算结果差异, 还有待增加团簇的原子数目范围, 用两版本的高斯软件包做进一步计算才能确定。

通过研究  $\text{FeSi}_n$  ( $n=1-8$ ) 团簇的红外光谱主要特征峰的归属, 发现稳定性较强的  $\text{FeSi}_3$  团簇和  $\text{FeSi}_6$  团簇的红外光谱峰值都来源于对称伸缩振动, 这表明团簇中原子之间的对称伸缩振动有易于保持团簇的结构稳定性。但是团簇原子间对称伸缩振动的机理, 与其他振动形式的对比, 与红外外光谱峰值的对应机制还有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 张 颖, 黄 意. 团簇物理学研究进展[J]. 科学技术创新, 2020, 20(2): 20-21.

- [2] Simon K V, Tulub A V. Structure and Magnetic Properties of Iron-Silicon Clusters in A Multiconfigurational Calculation[J]. Journal of Chemistry, 2015, 56(1): 1-9.
- [3] 梁冬梅, 黄 意, 陈 亮, 等. 不同方向外电场下  $\text{SiF}_2$  分子激发特性[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(4): 165-172.
- [4] 王广厚. 团簇物理学[M]. 上海: 上海科技出版社, 2003.
- [5] 黄耀清, 郝成红, 郑继明, 等. 硅团簇自旋电子器件的理论研究[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 83601-83607.
- [6] 张瑞俭, 王新强. 铝团簇的电子自旋极化与核自旋-自旋耦合的理论研究[J]. 原子与分子物理学报, 2007, 24(2): 257-264.
- [7] 张丙文. 过渡金属掺杂硅团簇及新型二维材料的预测与研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [8] 韩聚广, 张鹏飞. 过渡金属 Ag, Ir 和 Re 掺杂硅半导体团簇的电子结构和性质的理论研究[J]. 科学技术与工程, 2003, 3(3): 311-312.
- [9] 李成刚, 崔颖琦, 田 浩. 硅基过渡金属掺杂  $\text{MSi}$  ( $M=\text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}$ ) 团簇的结构和性质[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2022, 46(2): 72-79.
- [10] Beck S M, Andrews J M. Phase transition behavior observed in small silicon cluster ions [J]. The Journal of Chemical Physics, 1989, 91(7): 4419-4421.
- [11] 李小军, 毛 俊, 任宏江. 锌掺杂硅团簇  $\text{ZnSi}_n$  ( $n=2-8$ ) 及其氢化物的几何结构和稳定性[J]. 材料科学与工程, 2019(4): 725-732.
- [12] 林琳, 杨桔材, 迎 春, 等. 铬掺杂硅团簇的结构、稳定性和光电子谱性质研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020(6): 1389-1341.
- [13] Deng Chengzhi, Zhou Liqing, Li Guoliang, et al. Theoretical Studies on the Structures and Stabilities of Charged, Titanium-Doped, Small Silicon Clusters,  $\text{TiSi}_n^-/\text{TiSi}_n^+$  ( $n=1-8$ ) [J]. J Clust Sci, 2012(23): 975-993.
- [14] 廖文裕, 苏亚欣, 戚越舟, 等. 过渡金属铁团簇和反应的密度泛函理论研究[J]. 原子与分子物理学报, 2016, 33(5): 761-767.
- [15] 周步康, 范艳伟, 陈朝阳. 铁掺杂对不同导电类型硅材料电阻率的影响[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(7): 9-14.
- [16] Liu Y, Li G L. The structures and properties of  $\text{FeSi}_n/\text{FeSi}_n^+/\text{FeSi}_n^-$  ( $n=1-8$ ) clusters[J]. The European Physical Journal D, 2011, 64: 27-35.
- [17] Zhang Meng. High stability of the gold alloy fullerenes: A density functional theory investigation of  $\text{M}_{12}@\text{Au}_{20}$  ( $M=\text{Na}, \text{Al}, \text{Ag}, \text{Sc}, \text{Y}, \text{La}, \text{Lu}, \text{and Au}$ ) clusters[J]. 中国物理 B(英文版), 2012(5).
- [18] Frisch M J, Trucks G W, Schlegel H B, et al. Gaussian 09 Revision C. 01[M]. Gaussian, Inc. Wallingford CT, 2010.
- [19] 董彩霞. 钒掺杂硅团簇  $\text{VSin}^{0/+}$  ( $n=6-16$ ) 的结构与稳定性研究[J]. 内蒙古工业大学学报, 2021(6): 206-208.
- [20] 李小军. 锌掺杂硅团簇  $\text{ZnSi}_n$  ( $n=2-8$ ) 及其氢化物的几何结构和稳定性[J]. 材料科学与工程学报, 2019(5): 726-733.
- [21] 张 颖, 岳 莉, 吴学科, 等.  $(\text{MgC})_n$  ( $n=1-10$ ) 团簇结构稳定性及金属性的第一性原理研究[J]. 原子与分子物理学报, 2015(6).
- [22] 李小军, 卢 雪, 任宏江, 等.  $\text{H}_m\text{TiSi}_n$  ( $m=1-2; n=2-8$ ) 团簇结构、电子性质和、电子性质和 红外光谱的密度泛函理论研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019(39): 65-73.
- [23] Gao Moran, He Junbao, Zhu Wenliang. Magnetotransport properties of a Nodal Line Semimetal  $\text{TiSi}$ [J]. Chin Phys. Lett, 2018, 39.

(上接第 204 页)

- [18] 碳交易网. 2022 年 5 月碳排放配额/CCER 碳指标交易市场买卖行情价格与碳资产开发管理的行业门户网站[EB/OL]. (2022-05-14)[2022-10-06]. <http://www.tanjiaoyi.com/>.
- [19] 舒华. 钢铁酸洗废液的回收利用研究[J]. 化学工程师, 2003(2): 61-62, 64.
- [20] 熊秋亮, 黄兴元, 陈 丹. 废旧塑料回收利用技术及研究进展[J].

工程塑料应用, 2013, 41(11): 111-115.

- [21] 科沃斯官网. 2021 年 3 月 DEEBOT T9 系列地面清洁机器人说明书[EB/OL]. (2021-03-09)[2022-10-06]. <https://static.ecovacs.cn/upload/oms/2021/03/09/20210309132910356.pdf>.
- [22] 科沃斯官网. 2021 年 3 月科沃斯扫地机器人[EB/OL]. (2021-03-09)[2022-10-06]. <https://mall.ecovacs.cn/>