



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160397

生命周期评价视角下的机电产品碳足迹分析模型研究

郑辉¹, 王玎¹, 方丽霞²

- (1. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222;
2. 中国船舶重工集团公司天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要: 从机电产品碳足迹分布出发, 基于全生命周期, 建立产品碳足迹分析模型, 确定产品系统边界, 对生命周期各阶段的清单数据进行收集与分析, 建立碳足迹计算模型, 应用 Gabi 软件对产品碳足迹进行核算. 通过建立敏感性分析模型, 对影响产品碳足迹因素的敏感度进行分析计算, 提取关键影响因素; 提出层次分析与概率分布 (AHP-probability distribution, AHP-PD) 不确定性分析方法, 判断和量化输入数据所产生的不确定性, 优化数据收集方案, 从而真实地反映全生命周期产品碳足迹分布, 反馈指导后续低碳设计. 最后以变压器为例, 验证了该方法的可行性与有效性.

关键词: 全生命周期; 碳足迹; 敏感性分析; 不确定性分析; 变压器

中图分类号: TP271⁺.4; X820.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2017)06-0065-08

A New Carbon Footprint Analysis Model of Mechanical and Electrical Products from the Perspective of Life Cycle Assessment

ZHENG Hui¹, WANG Ding¹, FANG Lixia²

- (1. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;
2. Tianjin Institute of Navigation Instrument, China Shipbuilding Industry Corporation, Tianjin 300131, China)

Abstract: In light of the carbon footprint of mechanical and electronic products, based on the life cycle, a new carbon footprint analysis model was established, the product system boundary was determined, and the inventory data at each stage of the life cycle was collected and analyzed. A carbon footprint calculation model was then set up. Gabi software was applied to calculating the carbon footprint of the product. Through the establishment of model sensitivity analysis, the influencing factors of the sensitivity of the product's carbon footprint was calculated and the key factors were extracted. AHP-probability distribution uncertainty analysis method was proposed, thereby determining and quantifying the uncertainty due to the input data, and optimizing the data collection scheme. Therefore, the method can reflect the whole life cycle of the carbon footprint of the real product and give some guidance to the follow-up low carbon design with feedback. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method were verified by the example of a transformer.

Key words: life cycle; carbon footprint; sensitivity analysis; uncertainty analysis; transformer

放眼全球, 可再生能源、绿色能源正处在代替化石能源的前期, 循环经济、低碳技术方兴未艾, 以低能耗、低污染为基础的“低碳经济”已成为全球关注的热点^[1]. 工业产品的全生命周期中会产生大量碳排放, 是主要碳排放来源之一^[2]. 减少碳及相关污染物的排放则是解决碳排放问题的主要方法.

目前, 国内外学者从多个视角对其展开研究, 积极探索减少产品碳足迹的途径. Ross 等^[3]提出生命周期评价技术是最为有效的绿色设计与制造共性支撑技术. Joyce 等^[4]提出通信产品碳足迹的启发式方法. Dias 等^[5]对不同标准下的碳足迹计算结果和应用情况进行分析, 并对 3 种方法差异性产生的原因进行

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-05-16

基金项目: 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室资助项目; 天津科技大学青年教师创新基金资助项目 (2014CXLG17)

作者简介: 郑辉 (1978—), 女, 黑龙江人, 副教授, tjzhenghui@tust.edu.cn

探讨,从而提高计算结果的一致性. Zhang 等^[6]对零部件间连接特征进行分析,并采用层次分析法对连接单元的碳足迹进行递归分配,提出关于连接单元的碳足迹计算方法. Venkatesh 等^[7]利用过程框架,并采取统计建模方法,建立了化石燃料生命周期温室气体排放的不确定性评价模型. Yoshika 等^[8]为减少 CO₂ 排放与污染物,倡导利用生物质电能代替传统发电并提出了利用生命周期过程分析能量平衡和 CO₂ 排放的计算方法. Ameta 等^[9]提出了碳足迹公差分析法,计算制造与装配阶段的碳足迹,为产品低碳设计提供决策依据. Ball 等^[10]通过研究材料、能量及废物流之间的关系及材料—能源—废物流模型,提出从低碳排放到排放物利用的转变,对制造企业的零碳实现技术进行了探索. 利用产品基本信息与加工信息, Haapala 等^[11]建立了产品制造过程的能耗预测模型,并对产品的环境绩效分析,有效降低了其生命周期中能源及原材料的消耗与废弃物的排放. 作为当前研究热点,近年来国内部分高校、科研单位和企业对碳排放分析与评估方法也相继开展研究. 王微等^[12]将国内外现有的碳足迹研究进行了系统地归纳与回顾,通过碳足迹的计算方法及研究内容对碳足迹研究进行展望. 鲍宏等^[13-14]在绿色设计的基础上对产品的碳足迹进行分析,实现产品优化设计. 并通过分析产品碳足迹影响因素,提出产品碳足迹静态分析方法,为碳足迹评估提供依据. 张成等^[15]建立了生命周期清单分析参数,对机械产品使用过程中温室气体的排放进行生命周期评估,并进行清单计算和结果比较.

以上学者在碳足迹研究中未建立基于全生命周期的完整的碳足迹分析模型,因而未能系统地对产品从制造到废弃的整个生命过程中的碳足迹进行计算及对碳排放较大的影响因素进行敏感性与不确定性分析. 本文基于全生命周期,建立碳足迹计算流程与碳足迹计算模型,对各阶段碳足迹进行分析;建立敏感性分析模型,对产品碳足迹影响因素的敏感度进行分析计算,提取关键影响因素;提出层次分析与概率分布(AHP-probability distribution, AHP-PD)不确定性分析方法,判断和量化输入数据所产生的不确定性,优化数据收集方案,从而真实地反映产品碳足迹,并反馈指导后续的设计.

1 产品碳足迹计算流程

产品碳足迹是指单一产品从“从摇篮到坟墓”,

即其制造、使用及废弃的整个生命过程中,因燃料使用及处理所导致的温室气体排放量^[16]. 结合全生命周期思想,对产品原材料及能源获取、制造与装配、运输、使用、回收处理等各生命周期阶段中产生的温室气体排放量进行量化与计算. 产品碳足迹计算包括 4 个关键阶段:目标与范围确定阶段、数据准备与计算阶段、后续处理阶段和核查与声明阶段,计算流程见图 1.

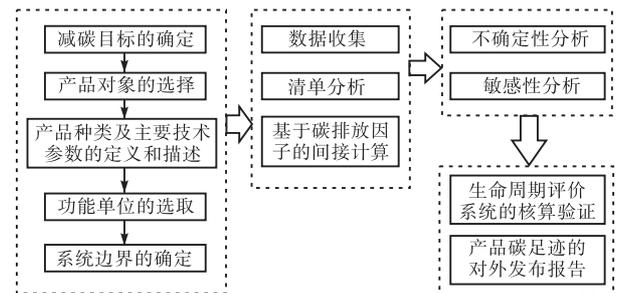


图 1 产品碳足迹计算流程

Fig. 1 Calculation process of the product carbon footprint

1.1 目标与范围确定

选取产品为研究对象,其在全生命周期中各阶段的碳足迹分布情况可以通过清单数据分析以及碳足迹计算得出;可以通过结果分析找出对碳排放贡献影响较大的生命周期阶段及碳排放产生原因;可以通过敏感性分析找出影响碳排放较大的因素,指导设计人员进行后续低碳设计改进,从而减少产品碳足迹. 对于某些结构复杂的产品,在保证计算结果的正确性基础上,为降低计算过程的复杂性,将对产品全生命周期排放计算结果影响不大的零部件省略,从而简化产品结构,方便碳足迹计算.

1.2 功能单位的选取

功能单位是碳足迹计算的基础^[17],功能单位的确定可以为后续清单数据分析过程中的数据收集提供参考依据.

1.3 系统边界的确定

系统边界定义了产品全生命周期中碳足迹计算的范围,即产品数据收集所包含的各生命周期阶段的数据^[18]. 由于 PAS2050 是第一部通过统一的方法计算产品碳足迹的规范性文件,已得到各领域企业的验证,故本文采用 PAS2050 作为碳足迹计算准则,根据对企业实际调研过程中数据获取信息情况,设定产品的碳排放评价系统边界包括原材料及能源获取、制造与装配、运输、使用、回收处理阶段.

1.4 输入数据的收集

收集碳足迹相关数据,建立数据库是碳足迹全生命周期评价计算的前提,环境的废物排放量的确定,需要科学测量手段来收集数据^[19]. 计算产品碳足迹所需收集的数据信息如图2所示. 目前,国外一些发达国家已通过生命周期评价清单分析软件收集了大

量碳足迹排放数据,但由于地域差异,国外的数据不能为我们直接利用. 为分析我国碳足迹排放数据,逐步建立起适合我国国情的数据库,应由国家主管部门或各行业协会组织要求企业积极收集生产过程中与碳排放有关的数据,为后续的低碳设计研究提供数据支持.

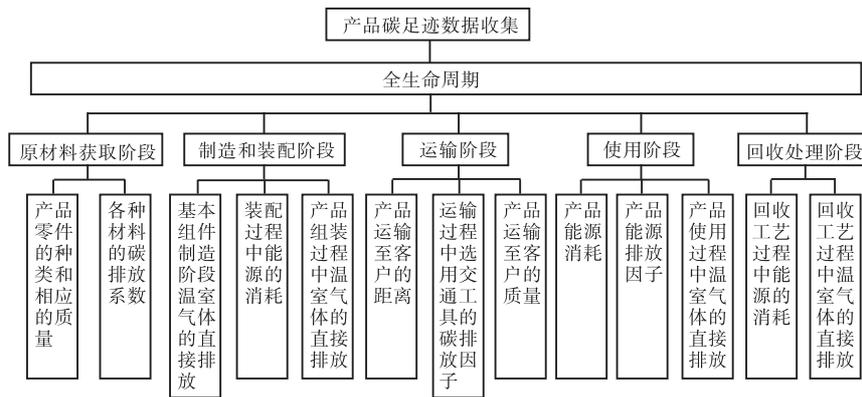


图2 产品碳足迹数据收集

Fig. 2 Data collecting of the product's carbon footprint

2 产品碳足迹计算模型

在现有产品碳足迹计算方法中,目前主要采用的有投入产出分析(input output assessment)、生命周期评价(life cycle assessment, LCA)、混合生命周期评价(hybrid LCA)^[20],但这些方法仍存在一定的局限性,实施周期较长,对后续设计的适应性不强. 因此,本文结合全生命周期思想,对生命周期进行分解和系统边界的确定. 采用PAS2050作为碳足迹计算准则,考虑材料消耗、能量消耗、温室气体的直接排放等因素,对产品原材料获取阶段、制造装配阶段、运输阶段、使用阶段、回收处理阶段进行分解量化,给出各阶段的碳足迹计算公式.

2.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段碳足迹包含材料消耗和能量消耗量部分. 假设材料获取阶段有 n 种材料,能源获取阶段有 m 种能源,则该阶段碳足迹计算公式见式(1).

$$G_M = (\sum_{i=1}^n M_i \cdot \alpha_i + \sum_{j=1}^m E_j \cdot \beta_j) / \eta_{ij} \quad (1)$$

式中: M_i 为第 i 类材料实物量; E_j 为第 j 类的能源实物量; α_i 为第 i 类材料生产排放因子; β_j 为第 j 类能源生产排放因子, η_{ij} 为原材料获取阶段材料使用率.

2.2 制造与装配阶段

制造装配阶段碳足迹主要来源于能源消耗和温室气体直接排放两部分. 假设制造装配过程中消耗

m 种能源,排放 p 种温室气体,该阶段碳足迹计算公式见式(2).

$$G_p = (\sum_{j=1}^m E_j \cdot \beta_j + \sum_{k=1}^p O_k \cdot GWP_k) / \eta_{jk} \quad (2)$$

式中: E_j 为制造装配过程中消耗的第 j 类能源实物量; O_k 为排放的第 k 类温室气体实物量; β_j 为第 j 类能源的排放因子; GWP_k 为第 k 类气体全球增温潜势(即全球升温潜能值); η_{jk} 为制造与装配阶段能源利用率.

2.3 运输阶段

运输阶段的碳足迹主要考虑不同交通方式运输产品所造成的碳排放,主要包含运输工具消耗的和温室气体的直接排放,其决定因素为运输工具的选择、载重及运输距离. 该阶段最终的碳足迹计算公式见式(3).

$$G_t = \sum_{l=1}^q M_l \cdot D_l \cdot \gamma_l + \sum_{k=1}^p O_k \cdot GWP_k \quad (3)$$

式中: M_l 为第 l 类运输产品的质量; D_l 为运输距离; γ_l 为交通工具运输产品的碳排放因子; O_k 为第 k 类温室气体直接排放量.

2.4 使用阶段

使用阶段碳足迹主要考虑产品运行时电能消耗产生的碳排放及使用过程中温室气体的直接排放. 运行时碳足迹排放与实际日耗电量 E 、运行时间 t_w 及当地电力排放因子 β 成正比. 同理,另一部分碳

排放来源于使用过程中温室气体直接排放量,得出该阶段碳足迹计算公式见式(4).

$$G_U = 365E \cdot t_w \cdot \beta + \sum_{k=1}^p O_k \cdot GWP_k \quad (4)$$

2.5 回收处理阶段

材料的回收处理阶段碳足迹主要有材料消耗及能源消耗两部分,与原材料获取阶段相似,表达式见式(5).但不同的是,该阶段材料用于回收,需要考虑拆卸后零部件回收的材料对原材料获取和制造装配阶段的碳足迹的影响,因此将其在整个碳足迹计算模型中进行弥补.

$$G_R = \sum_{j=1}^m E_j \cdot \beta_j - \sum_{i=1}^n M_i \cdot \alpha_i \quad (5)$$

综上,产品碳足迹量化模型可表示为

$$G = G_M + G_P + G_T + G_U + G_R \quad (6)$$

3 敏感性与不确定性分析

通过敏感性分析识别出产品碳足迹评价中的主要数据,建立层次分析法与概率分布相结合的数据不确定度分析方法,对主要数据进行数据质量判定,提取出产品碳足迹评价中的关键数据,从而有效优化数据收集.

3.1 敏感性分析

敏感性分析是定量分析模型输入变量对输出结果影响程度的方法.在碳排放过程中,各因素对结果的敏感性表现为各因素对产品碳足迹计算结果的不同影响,碳排放影响因素敏感度与其对结果的影响成正比,其敏感度越高,对结果的影响也越大,则该因素的改进空间就越大.通过产品碳足迹计算可得到全生命周期中碳足迹最显著的阶段,以产品碳足迹为指标,选取该生命周期阶段的碳足迹影响因素,并对其敏感性分析,提取关键碳排放影响因素.

为比较不同因素对碳排放结果的敏感性,提取对产品碳足迹影响程度最大的因素,通过敏感性分析,计算全生命周期中各因素对产品碳足迹的敏感性数据,可得出敏感性矩阵

$$\begin{bmatrix} S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mi} \\ S_{p1} & S_{p2} & \cdots & S_{pi} \\ S_{t1} & S_{t2} & \cdots & S_{ti} \\ S_{u1} & S_{u2} & \cdots & S_{ui} \\ S_{r1} & S_{r2} & \cdots & S_{ri} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: S_{mi} 、 S_{pi} 、 S_{ti} 、 S_{ui} 、 S_{ri} 分别代表原材料获取阶

段、制造装配阶段、运输阶段、使用阶段、回收处理阶段的第 i 个因素对产品碳足迹的敏感性程度.以所选取因素现有值的产品碳足迹为基准,可由产品敏感性矩阵转化得到各生命周期因素在单位极小变化下的碳足迹变化矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta G_{m1} & \Delta G_{m2} & \cdots & \Delta G_{mi} \\ \Delta G_{p1} & \Delta G_{p2} & \cdots & \Delta G_{pi} \\ \Delta G_{t1} & \Delta G_{t2} & \cdots & \Delta G_{ti} \\ \Delta G_{u1} & \Delta G_{u2} & \cdots & \Delta G_{ui} \\ \Delta G_{r1} & \Delta G_{r2} & \cdots & \Delta G_{ri} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: ΔG_{mi} 、 ΔG_{pi} 、 ΔG_{ti} 、 ΔG_{ui} 、 ΔG_{ri} 分别代表原材料获取阶段、制造装配阶段、运输阶段、使用阶段、回收处理阶段的第 i 个因素在单位极小变化下产品碳足迹变化值.

定义碳排放影响因素的敏感性因子为

$$\begin{bmatrix} S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mi} \\ S_{p1} & S_{p2} & \cdots & S_{pi} \\ S_{t1} & S_{t2} & \cdots & S_{ti} \\ S_{u1} & S_{u2} & \cdots & S_{ui} \\ S_{r1} & S_{r2} & \cdots & S_{ri} \end{bmatrix} = \frac{\Delta I_i}{I_i \cdot G} \cdot \begin{bmatrix} \Delta G_{m1} & \Delta G_{m2} & \cdots & \Delta G_{mi} \\ \Delta G_{p1} & \Delta G_{p2} & \cdots & \Delta G_{pi} \\ \Delta G_{t1} & \Delta G_{t2} & \cdots & \Delta G_{ti} \\ \Delta G_{u1} & \Delta G_{u2} & \cdots & \Delta G_{ui} \\ \Delta G_{r1} & \Delta G_{r2} & \cdots & \Delta G_{ri} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: G 为各因素现有值的产品碳足迹; I_i 为第 i 个碳排放影响因素的现有值; ΔI_i 为第 i 个碳排放影响因素的改变值.

3.2 AHP-PD 不确定性分析

产品生命周期评价中存在着广泛的不确定性,例如原材料获取与加工,产品生产制造、使用及其回收处理处置,系统边界的确定,输入输出清单数据的获取以及评价分析过程所涉及的各种假设等方面均会导致不确定性的产生^[21].其中,在产品生命周期评价中最突出是输入输出数据的不确定性,因此在碳足迹计算过程中,需将全生命周期过程的不确定性纳入考虑范围.在碳足迹评价中,检测误差、数据代表性不足、关键数据缺乏、分配方法和核算模型的选取不确定等因素会不可避免地出现,所需数据获取与评估存在不一致性、主观性,这种具有不确定性的输入输出数据,对碳足迹计算结果会有一定的影响,不仅容易导致全生命周期清单分析结果的不同,还会影响后续有关分析工作.对不确定参数变化对碳足迹产生的

影响进行分析,可使选取的数据来源更为可靠,因此,判断和量化输入数据对所产生的不确定性已成为碳足迹评价结果的重要组成部分,可有效地对数据收集方案进行优化,从而真实反映碳足迹,反馈指导后续的设计。

采用 AHP 对统计代表性、数据来源可靠性、地理位置代表性、收集时间代表性、数据完整性等属性进行赋值,建立 AHP 模型如图 3 所示。根据专家意见,确定各因素之间的相对重要性,对重要性程度按照 1—9 标度法进行赋值,构造出层次中的判断矩阵,并计算一致性检验指标 CI 和一致性比率 CR ,计算公式见式(10)、式(11)^[22]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{10}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{11}$$

通常认为,当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵的一致性是可以接受的。



图 3 收集清单数据质量层次结构模型
Fig. 3 Inventory data quality hierarchy model

由于不确定性的清单参数具有一定取值范围,因而可以考虑用随机变量表示。对生命周期清单的输入进行不确定性量化分析,实际是以概率分布代替确定的输入数值,将其清单分析结果表达为统计分布的形式,而参数概率分布的确定可以运用统计分析法,数据服从的分布包括正态分布、几何分布、伽马分布、泊松分布、均匀分布等,在最终清单分析里用各个参数的平均值来代表其统计值,计算 AHP 模型中得到的特征向量基于 1 的标准偏差,得出概率分布模型描述随机抽样数据。

4 实例分析

以 SFPZ-240000/330 型变压器为例分析其全生命周期碳足迹,并设定运行 25 年变压器为碳足迹计算的功能单位。通过功能结构映射,变压器可分为器身、冷却装置、调压装置、保护装置、出线装置 5 个模块,确定其系统边界如图 4 所示。该款变压器为三相、风冷、强迫油循环、有载调压变压器,电压等级 330 kV,容量 24 万 kV·A,各主要零部件及材料清单、碳足迹清单分析模板及重要材料与能源排放因子分别见表 1、表 2、表 3。表中碳排放统一折算成 CO₂ 排放量。

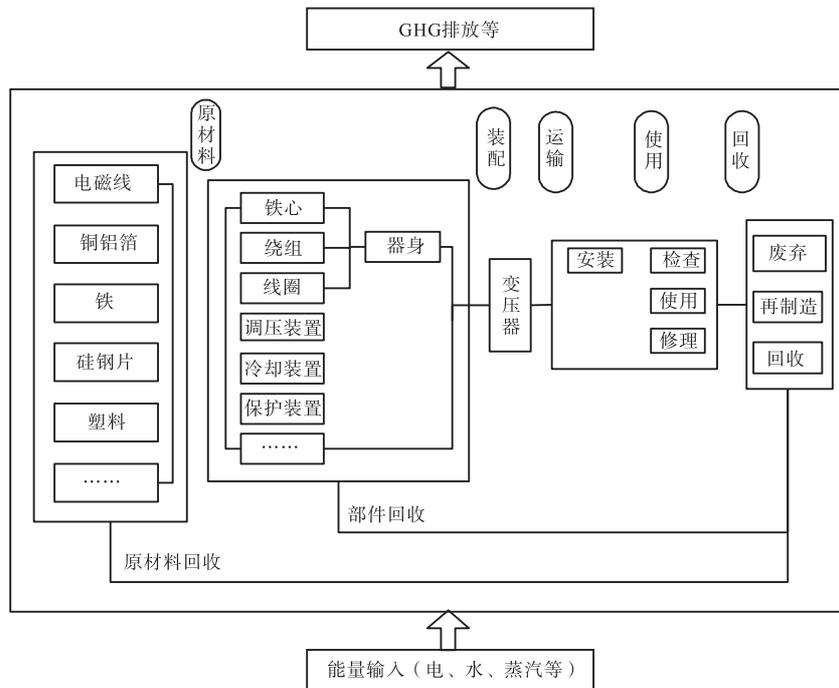


图 4 基于全生命周期的变压器系统边界
Fig. 4 Transformer system boundary based on full life cycle

表 1 SFPZ-240000/330 变压器主要零部件及材料清单

Tab. 1 Main parts and materials of SFPZ-240000/330 transformer

模块名称	零部件名称	数量或质量	原材料	备注
铁芯	冷轧硅钢片	82 200 kg	铜线	主材
线圈	自粘性换位导线	7 900 kg	铜线	主材
	组合导线	14 000 kg	铜线	主材
油箱	波纹储油柜	49 000 kg	钢板	主材
保护装置	中性点保护装置	1 个	—	保护类
	温控器	3 个	—	保护类
	温度显示器	3 个	—	保护类
	气体继电器	1 个	—	保护类
	蝶阀 BDZ-125	30 个	铸铁	主材
	球阀 QF-25	16 个	不锈钢	主材
	压力释放阀	2 个	—	保护类
出线装置	套管	9 个	不锈钢	主材
冷却装置	冷却器控制柜	1 个	—	保护类
绝缘装置	绝缘筒	6 个	石英	主材
调压装置	有载分接开关	1 组	—	主材

表 2 变压器碳足迹清单分析模板

Tab. 2 Transformer template list of carbon footprint analysis

生命周期阶段	数据项	量值
制造和装配	绝缘车间电耗	6 531 kW·h
	绕线车间电耗	14 034 kW·h
	铁芯车间电耗	7 437 kW·h
	总装车间电耗	17 234 kW·h
	配套车间电耗	3 452 kW·h
	电磁线车间电耗	17 982 kW·h
	绝缘车间蒸汽耗	75 m ³
	绕线车间蒸汽耗	194 m ³
	总装车间蒸汽耗	194 m ³
	运输	运往西北五省距离
油耗		0.14 L/km
使用	标准工作电耗	240 000 kW·h
	设计使用寿命	25 a
	每日工作时间	24 h
回收与处理	电耗	8 354 kW·h
	回收处理铜类与外壳	24 334 kg

表 3 重要材料与能源碳排放因子

Tab. 3 Important materials and energy carbon emission factors

材料或能源	碳排放因子
铁/钢	1.72 kg/kg
铜	3.64 kg/kg
锌	3.66 kg/kg
镁	2.83 kg/kg
铝	1.80 kg/kg
铁合金	3.60 kg/kg
柴油	2.73 kg/L
煤	2.46 kg/kg
西北电网电力	1.024 6 kg/(kW·h)

通过变压器碳足迹计算可得,全生命周期中,使用阶段与运输阶段对变压器碳足迹贡献最为显著. 变压器使用阶段和运输阶段中影响碳排放的主要因素分别为耗电量和运输能源方式、系统质量等. 基于 Gabi 软件对变压器碳足迹进行核算,核算结果及其对比结果见表 4. 与碳足迹计算模型相比较,核算结果中变压器碳足迹略高,其原因主要由于原材料及能源碳排放因子均来自于 Gabi 软件中自带数据库,由于地域差异,一些国外数据与我国实际情况还是存在区别. 由计算可知,变压器碳足迹最显著的阶段为使用阶段,该阶段碳足迹均由电力生产产生,我国多采用火力发电,与国外发电组成模式略有不同,因此计算结果相对有所不同. 以变压器现有碳足迹为指标,选取电力生产碳排放因子、平均运行功率、运输能源影响、回收利用率及系统质量为碳排放影响因素进行敏感性分析. 设影响因素变化范围为 10%,计算结果见表 5.

由上述结果可知:电力生产碳排放因子及平均运行功率对碳足迹影响最敏感,其次为系统质量、运输能源影响,回收利用率敏感度最小. 由于电力生产碳排放因子影响着变压器整个生命周期过程,电力生产碳排放是变压器碳排放的重要组成部分,因此,减小电力生产碳排放因子不仅将降低变压器使用阶段的碳足迹,还可减少原材料获取、制造与装配阶段及回收过程中电力消耗所产生的碳足迹,由于 SFPZ-240000/330 变压器运行功率巨大,改变其参数也会引起碳排放大幅变化,因此运行功率也是影响变压器碳足迹的关键性因素.

表4 变压器各生命周期碳足迹

Tab. 4 Carbon footprint of transformer in each life cycle

功能单位	碳足迹计算结果/ (kg·kg ⁻¹)	Gabi 软件核算结果/ (kg·kg ⁻¹)
原材料获取阶段	5.573 × 10 ⁵	5.767 × 10 ⁵
制造与装配阶段	4.831 × 10 ⁵	4.659 × 10 ⁵
运输阶段	1.504 × 10 ⁷	1.598 × 10 ⁷
使用阶段	5.385 × 10 ⁹	5.394 × 10 ⁹
回收与处理阶段	-3.797 × 10 ⁵	-3.581 × 10 ⁵
单位变压器碳足迹总量	5.401 × 10 ⁹	5.412 × 10 ⁹

表5 碳足迹影响因素敏感性分析结果

Tab. 5 Sensitivity analysis of influencing factors of carbon footprint

影响因素	碳足迹变化/ (kg·kg ⁻¹)	敏感度
电力生产碳排放因子	5.237 4 × 10 ⁸	9.697 2 × 10 ⁻¹
平均运行功率	5.236 9 × 10 ⁸	9.696 3 × 10 ⁻¹
运输能源影响	1.803 3 × 10 ⁶	3.339 × 10 ⁻³
回收利用率	3.170 8 × 10 ⁵	5.871 × 10 ⁻⁴
系统质量	1.821 1 × 10 ⁶	3.371 × 10 ⁻³

根据层次模型分别对电力生产碳排放因子、运输能源影响因素构造判断矩阵如下:

$$A_D = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/5 & 3 & 3 \\ 5 & 5 & 1 & 7 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1/7 & 1 & 1 \\ 3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_N = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 5 & 3 & 1/3 \\ 5 & 1 & 5 & 3 & 1 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 2 & 1 & 1/3 \\ 3 & 1 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

求得其特征向量分别为

$$W_D = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0.07, 0.22, 0.50, 0.09, 0.12)$$

$$W_N = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0.16, 0.38, 0.06, 0.09, 0.31)$$

对应的特征值为 $\lambda_{D,max} = 5.33$, $\lambda_{N,max} = 5.414$. 计算得到检验系数

$$CI_D = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0.083$$

$$CR_D = \frac{CI}{RI} = 0.074 < 0.1$$

$$CI_N = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0.103$$

$$CR_N = \frac{CI}{RI} = 0.092 < 0.1$$

由于检验系数均满足检验条件,该判断矩阵的一

致性是可以接受的.

对原始数据取值范围的统计分布进行设置,本文假设运输能源影响因素与电力生产碳排放因子原始数据服从正态分布类型. 清单里用各个参数的平均值来代表其统计值,由上述计算可得,电力生产碳排放因子服从正态分布 $N(1.0246, 0.1773)$, 运输能源选择服从正态分布 $N(2.73, 0.1379)$, 如图5所示. 在90%的置信区间内,电力生产碳排放因子相对于运输能源影响因素的不确定性更显著.

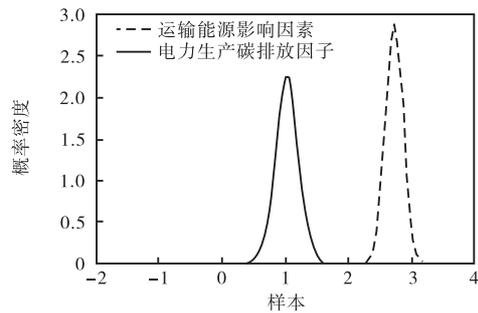


图5 电力生产碳排放因子及运输能源影响因素概率分布示意图

Fig. 5 Probability distribution diagram of the power production emission factor and transportation energy factor

5 结 语

本文以机电产品为研究对象,基于全生命周期思想进行碳足迹分析. 结果表明:在变压器全生命周期中,使用阶段碳排放对碳足迹总量的贡献比例最高,达到99%,其次为运输阶段,其中使用阶段碳排放主要产生在电能生产过程. 在变压器全生命周期过程中,对碳足迹影响最为敏感的为电力生产碳排放因子和平均运行功率,且电力生产碳排放因子相对于运输能源影响因素的不确定性更为显著.

为分析我国碳足迹排放数据,必须逐步建立适合我国国情的数据库,应由国家主管部门或各行业协会组织要求企业积极收集生产过程中与碳排放有关的数据,从而为后续的低碳设计研究提供数据支持.

参考文献:

- [1] 孙良峰. 面向低碳的产品结构再生设计与反馈关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [2] 卞晓红,张绍良. 碳足迹研究现状综述[J]. 环境保护与循环经济,2010,30(10):16-18.
- [3] Ross S, Evans D. Use of life cycle assessment in envi-

- ronmental management[J]. Environment Management, 2002, 29(1): 132-142.
- [4] Joyce T, Okrasinski T A, Schaeffer W. Estimating the carbon footprint of telecommunications products: A heuristic approach[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(9): 094502-1-094502-4.
- [5] Dias A C, Arroja L. Comparison of methodologies for estimating the carbon footprint-case study of office paper [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24(3): 30-35.
- [6] Zhang X F, Zhang S Y, Hu Z Y, et al. Identification of connection units with high GHG emissions for low-carbon product structure design[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 27(6): 118-125.
- [7] Venkatesh A, Jaramillo P, Griffin W M, et al. Uncertainty analysis of life cycle greenhouse gas emissions from petroleum-based fuels and impacts on low carbon fuel policies[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 45(1): 125-131.
- [8] Yoshika T, Aruga K, Nitami T, et al. Energy and carbon dioxide(CO₂) balance of logging residues as alternative energy resources: System analysis based on the method of a life cycle inventory(LCI) analysis[J]. Journal of Forset Research, 2005, 10(2): 125-134.
- [9] Ameta G, Mani M, Rachuri S, et al. Carbon weight analysis for machining operation and allocation for redesign[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2009, 2(4): 241-251.
- [10] Ball P D, Evans S, Leversa A, et al. Zero carbon manufacturing facility-towards integrating material, energy, and waste process flows[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(9): 1085-1096.
- [11] Haapala K R, Khadke K N, Sutherland J W. Predicting manufacturing waste and energy for sustainable product development via WE-Fab software[C]//Proceedings Global Conference on Sustainable Product Development and life Cycle Engineering. 2004: 243-250.
- [12] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2010, 37(7): 71-78.
- [13] 鲍宏, 刘光复, 王吉凯. 采用碳足迹分析的产品低碳优化设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(2): 264-272.
- [14] 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.
- [15] 张成, 浦耿强, 王成焘. 电动自行车与燃油助动车生命周期评价的比较[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(4): 69-71.
- [16] 邓转利. 模杯型文胸产品生产过程中碳足迹分析及评估模型研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2013.
- [17] 姜高超. 可拓知识分类方法及其在产品低碳设计中的应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [18] 王吉凯. 基于产品生命周期的碳排放计算方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [19] 戴宏民, 戴佩华. 生命周期评价数据收集及清单分析研究[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2003, 20(3): 1-3.
- [20] 鲍宏. 锻压机床碳足迹分析与低碳设计映射方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [21] 陈莎, 李焱佩, 曹磊, 等. 产品碳足迹评价中不确定度与敏感度相结合的数据质量分析[J]. 中国环境科学, 2014(4): 1067-1072.
- [22] 吴育华, 杜纲. 管理科学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.

责任编辑: 常涛