

基于全生命周期评价的变压器碳足迹模型研究

毕子健¹, 刘泽其¹, 许远超², 刘燕泽华², 李笑怡¹

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054; 2. 中国电子工程设计院有限公司, 北京 10054)

摘要: 以国网冀北电力有限公司的供应商所提供的变压器数据为基础, 构建了一个基于全生命周期的产品碳足迹评价流程和评估模型。模型有效地计算了不同容量下 10 kV 油浸式与干式变压器从“摇篮”到“大门”的碳排放, 得到不同类型变压器碳足迹组成及变压器容量不同时各零部件生产过程碳排放的变化, 明确碳减排重点关注单元。形成供应商碳足迹核算报告标准范本, 为形成典型电网物资产品碳足迹的权威数据库奠定基础, 确定减少变压器碳排放的关键措施, 有助于实现产品的低碳化。通过基于全生命周期的产品碳足迹评价, 推动国网冀北电力有限公司相关产品全供应链参与, 内在驱动整个供应链协同创新和持续改进, 改变全过程的资源环境效率。

关键词: 碳足迹模型; 变压器; 全生命周期; 产品低碳化

中图分类号: TM4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7204(2023)02-0108-06

Research on Carbon Footprint Model of Transformer Based on Life Cycle Assessment

BI Zi-jian¹, LIU Ze-qi¹, XU Yuan-chao², LIU Yan-ze-hua², LI Xiao-yi¹

(1.State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054;

2.China Electronics Engineering Design Institute CO.,LTD, Beijing 100054)

Abstract: Based on the transformer data provided by the supplier of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., a product carbon footprint evaluation process and evaluation model based on life cycle assessment is constructed. The model effectively calculates the carbon emissions of 10 kV oil-immersed and dry-type transformers from cradle to gate under different capacities, obtains the carbon footprint composition of different types of transformers and the changes of carbon emissions of various parts in the production process with different transformer capacities, and defines the key units for carbon emission reduction. The model also forms the standard case of supplier's carbon footprint accounting report, lays the foundation for the authoritative database of typical power grid material products, determines the key measures to reduce carbon emissions of transformers, and helps to realize low carbonization of products. Through the evaluation of product carbon footprint based on life cycle assessment, the whole supply chain of related products of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. participated, which internally drives the collaborative innovation and continuous improvement of the whole supply chain, and changes the resources and environment efficiency of the whole process.

Key words: carbon footprint model; transformer; full life cycle; low-carbon products

引言

在全球气候变暖的背景下, 以低能耗、低污染为基

础的低碳经济已成为热门话题。在当今经济生活中, 工业产品占有重要地位, 整个生命周期产生大量碳排放,

基金项目: 面向电网高质量发展的绿色低碳供应链研究, 项目编号: 52010122001V。

是碳排放的主要来源之一^[1]。产品碳足迹 (Carbon Footprint, CFP) 是通过量化产品从原材料获取、制造、装配、运输、使用和回收等全生命周期或选定过程中的所有重要温室气体排放量和清除量, 计算产品对全球变暖的贡献, 以二氧化碳当量表示^[2]。生命周期评价方法 (ISO 14040、ISO 14044, 已对应转化为 GB/T 24040、GB/T 24044) 以及基于上述标准的 ISO 14067 是开展 CFP 核算的基本方法。

目前, 国内外学者从制造、材料等各方面积极探索降低产品碳足迹的生产过程和途径, 基于生命周期完全碳足迹的分析模型系统地计算从生产到废弃的整个生命周期的碳足迹^[3-5]。CFP 研究大主要包括以下 2 种生命周期评价方法^[6]: 从“摇篮”到“坟墓”的全生命周期评估, 包括从资源开采到使用阶段和处置阶段;

从“摇篮”到“大门”是对从资源开采到工厂大门 (即在运输到消费者之前) 的部分生命周期的评估。

变压器是电力系统的重要组成, 也是国网冀北电力有限公司重点电力物资之一, 但目前国内学者对变压器的碳足迹核算研究还不够全面^[7]。

本研究中, 以产品生命周期评价方法为基础, 采用了从摇篮到门的方法, 建立了产品碳足迹分析模型和碳足迹计算流程, 收集国网冀北电力有限公司变压器供应商数据, 并利用 Simapro 软件计算产品的碳足迹。为国网冀北电力有限公司所涉及的 10 kV 变压器提供环境数据, 并进行不确定性分析, 优化数据采集方案, 真实反映产品碳足迹, 推动国网冀北电力有限公司相关产品全供应链参与, 内在驱动整个供应链协同创新和持续改进, 改变全过程的资源环境效率。

1 碳足迹评价流程

电网物资碳足迹核算包括五个关键步骤: 典型电网物资选取、核算模型搭建、数据获取筛选、数值计算以及计算结果应用, 具体实施路径如图 1 所示。

1.1 目标和范围确定

1) 目标类型

从采购方的优选产品类型选取, 并可根据能效等级、干式 / 油浸、容量指标、防污等级、铁芯类型、温度范围、海拔范围等多个指标开展分类, 上述指标均可不同程度影响变压器的材料构成与生产耗能及最终碳足迹。根据国网冀北电力有限公司近 3 年采购实际, 结合调研过程中所有厂家均以物料编码为提供数据的分类依据, 最终确定 7 种高效能变压器为目标类型, 如表 1 所示。

2) 系统边界分析与确定

高效能变压器的全生命周期包括资源开采、零部件生产、变压器组装、变压器使用、回收处理等阶段^[8]。其回收处理阶段难以纳入供应商碳足迹的管控能力与范围, 且由于变压器使用阶段能耗与

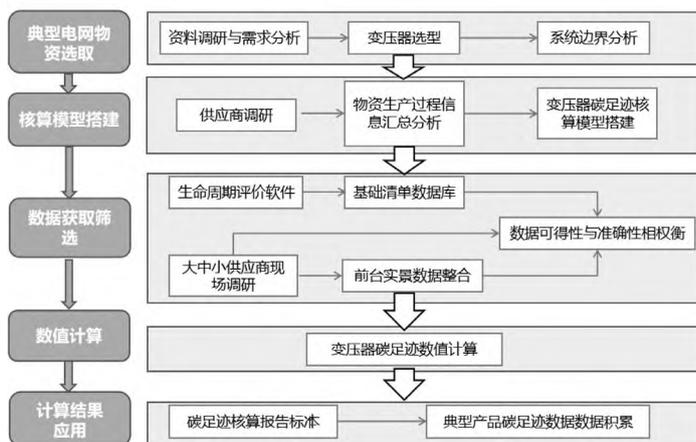


图 1 电网物资碳足迹核算实施路径图

表 1 7 种高效能变压器信息

序号	物料编码	物料描述
1	500007396	10 kV 变压器, 400 kVA, 普通, 硅钢片, 油浸
2	500007402	10 kV 变压器, 200 kVA, 普通, 硅钢片, 油浸
3	500007419	10 kV 变压器, 100 kVA, 普通, 硅钢片, 油浸
4	500007398	10 kV 变压器, 1 000 kVA, 普通, 硅钢片, 干式
5	500007421	10 kV 变压器, 1 250 kVA, 普通, 硅钢片, 干式
6	500007414	10 kV 变压器, 800 kVA, 普通, 硅钢片, 干式
7	500007447	10 kV 变压器, 800 kVA, 普通, 硅钢片, 油浸

碳排放均远高于生产阶段，难以准确获得变压器使用阶段的负载等关键数据，因此本研究变压器的系统边界为从“摇篮”到“大门”。

3) 数据收集筛选

碳足迹核算数据的质量在很大程度上取决于输入数据的质量。根据 ISO 14067 标准，最好使用来自公司自身流程的数据（即主要数据）^[6]。对不同生产规模（大型、中型和小型）的供应商开展调研，通过现场调研和碳足迹的试计算，缩略至供应商较易操作的数据填写模板，如图 2 所示。

按照基础数据所导致的碳足迹变化幅度与显著程度进行数据采集目标的缩略。按照不同原辅材料、不同能源类型在产品碳足迹中的占比，结合不同供应商提供其产品数据的差异性，确定缩略数据类型，本研究中，由于供应商提供数据较为全面，数据缩略较少。

本研究在确认供应商数据的来源清楚、计算方式准确前提下，均以供应商调研数据为首要采信数据，其他无法完全从调研中获得的核算数据，则依靠较高质量数据库进行链接应用。使用 simapro 软件，以本土化生命周期清单数据库为基础，以 EcoInvent 国际数据库、Gabi 自带数据库为补充。

1.2 碳足迹核算模型搭建

1) 碳排放计算

碳足迹核算模型基于生命周期评价方法建立，其核算模型内核如式（1）所示：

$$CF = \sum_j^n \sum_k^n c_{fjk} = \sum_j^n \sum_k^n c_{jk} \times f_{jk} \quad (1)$$

式中：

j—产品及其组件生产的单元过程；

k—产品及其组件生产单元过程所消耗的资源 and 能源类型；

c_{jk} —产品及其组件生产的 j 单元过程消耗的 k 类资源或能源的碳足迹；

f_{jk} —产品及其组件生产的 j 单元过程消耗的 k 类资源或能源的消耗量；

CF—产品碳足迹。

2) 产品生命周期模型图

本研究中变压器的碳足迹核算模型主要包括原材料开采、变压器组件材料/元器件生产、变压器组件生产，变压器组装与使用四个部分，各个部分所涉及的 CO₂ 排放核算如图 3 所示，产品的碳足迹是生命周期各阶段的碳排放总和。

变压器碳足迹核算模型共包括 1 666 个单元过程的资源能源消耗和碳排放，物料的碳足迹由各个单元过程的碳排放累加得出，相互连接的单元过程之间碳排放数量关系由资源和能源消耗数量所表示。

3 碳足迹计算结果分析

3.1 不同类型变压器碳足迹

根据供应商反馈数据及上述器碳足迹核算模型核算

10KV干式变压器碳足迹核算数据采集表					10KV油浸式变压器碳足迹核算数据采集表				
产品类型基本参数					产品类型基本参数				
变压器物料编码		容量			变压器物料编码		容量		
能效		铁芯方式			能效		铁芯方式		
产品碳足迹核算产品组成数据（重量、长度、面积填写一项即可）					产品碳足迹核算产品组成数据（重量、长度、面积填写一项即可）				
产品组成	规格型号	重量 (kg)	长度 (m)	面积 (m ²)	产品组成	规格型号	重量 (kg)	长度 (m)	面积 (m ²)
铜线					铜线				
铜箔					铜箔				
硅钢片					变压器油				
铜排					硅钢片				
钢板					钢板				
槽钢					铁芯夹件				
钢管					纸板				
紫铜					铜排				
产品碳足迹核算用能数据					产品碳足迹核算用能数据				
单个产品生产用能 (度)		厂区供电光伏占比			单个产品生产用能 (度)		厂区供电光伏占比		

图 2 优化后供应商提供变压器数据表

出 4 类油浸式变压器的碳足迹结果见表 2。

根据浙江江山变压器有限公司提供的干式变压器数据，核算后碳足迹结果如图 4 所示。

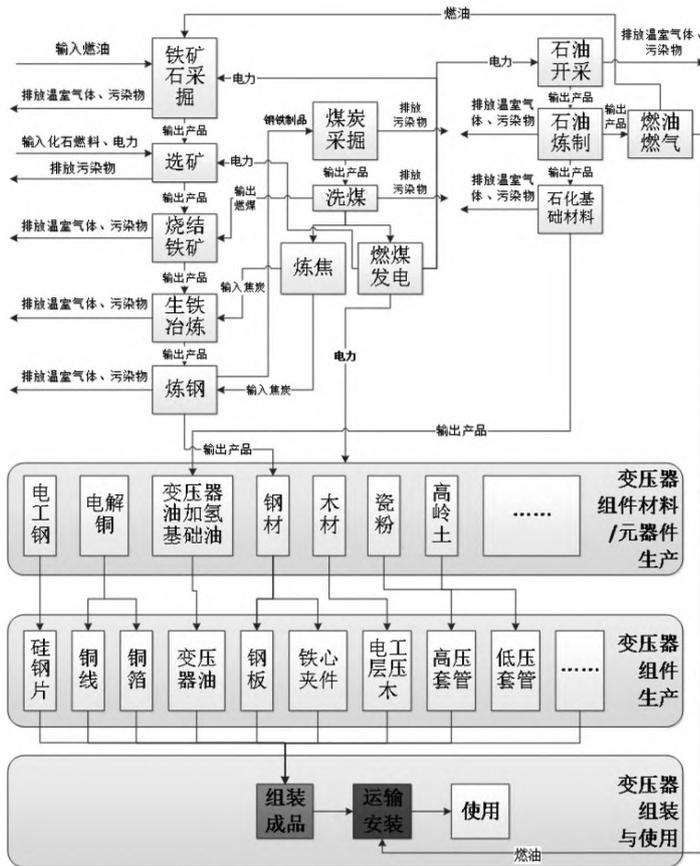


图 3 变压器碳足迹核算模型

表 2 10 kV 油浸式变压器碳足迹核算结果

供应商	能效等级	容量	碳足迹 (kgCO ₂ e)
许继	一级	100 kVA	3 474.99
		200 kVA	5 810.40
		400 kVA	8 862.29
	二级	800 kVA	13 336.00
		100 kVA	3 046.10
		200 kVA	4 816.71
科锐	一级	200 kVA	4 627.40
	二级	100 kVA	2 844.23
	二级	400 kVA	5 459.99
宁波奥克斯	二级	400 kVA	6 365.60
平高	二级	400 kVA	5 672.63

由表 3 和图 3 可知，虽基于能效和供应商的不同仍有所区别，但二氧化碳排放量仍然是随着变压器容量的升高而递增。这是因为容量越大，变压器生产所需要的材料（如铁芯、油箱等）越多，其生产过程中所产生的 CO₂ 越多。此外，相同厂家的变压器，不论是干式还是油浸式，容量低时不同能效变压器碳足迹结果差异性小；容量越高，相同容量下能效等级高的变压器二氧化碳排放量越少。

3.2 变压器碳足迹组成

1) 油浸式变压器

由图 5 可知，对于 10 kV 油浸式变压器，碳足迹主要由铜线、硅钢片、变压器油、钢板和铜箔生产过程的碳排放组成，与 100 kVA 的变压器相比，200 kVA 的变压器在增加容量后，铜线的碳排放量由 810.08 kg CO₂e 增加至 1 639.22 kg CO₂eq，硅钢片的碳排放量由 443.69 kg CO₂eq 增加至 1 289.49 kg CO₂eq，分别增加了 2 倍和 2.9 倍，这说明变压器容量增加对铜线和硅钢片的需求影响较大，可重点关注这两类零件的碳减排。此外，油浸式变压器生产组装用能所占碳排放比例相对较小。

2) 干式变压器

由图 6 可知，对于 10 kV 干式变压器，

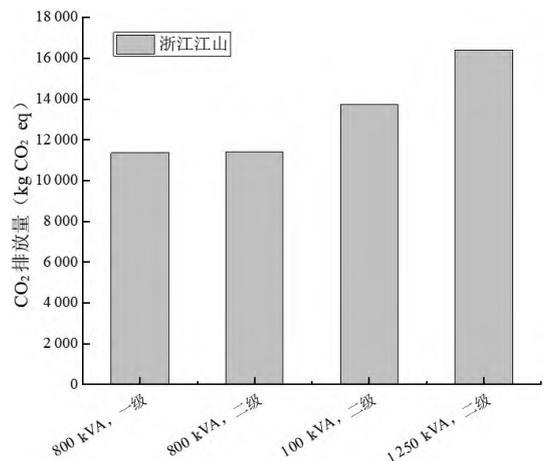


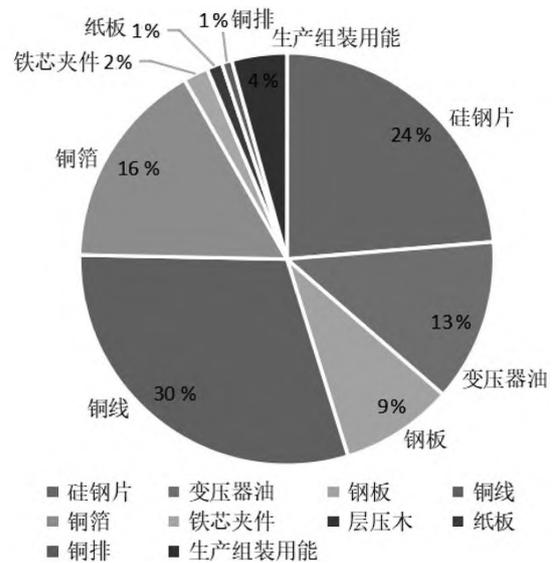
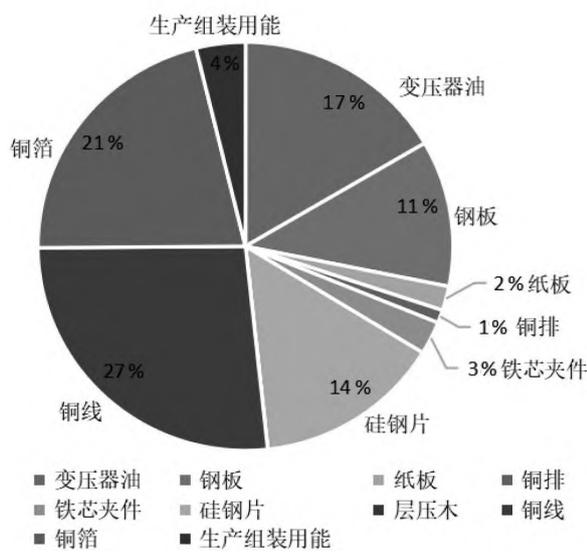
图 4 10 kV 干式变压器碳足迹核算结果

碳足迹主要由铜线、硅钢片、铜箔生产过程及生产组装用能的碳排放组成，与 800 kVA 的变压器相比，1 250 kVA 的变压器在增加容量后，硅钢片、生产组装用能和铜箔的碳排放量都增加了近 1.6 倍，与油浸式变压器不同，容量变化对铜线碳排放量影响较小。相比于油浸式变压器，干式变压器的生产组装用能所占碳排放比例较高，可达 18%，这说明可从生产组装环节探索干式

变压器的碳减排方法。

3.3 不确定性分析

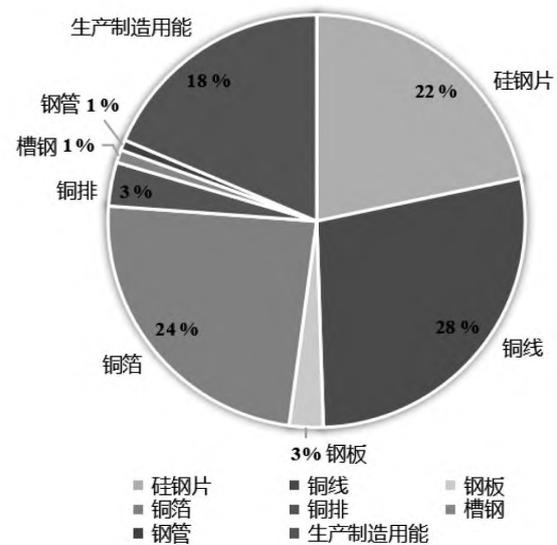
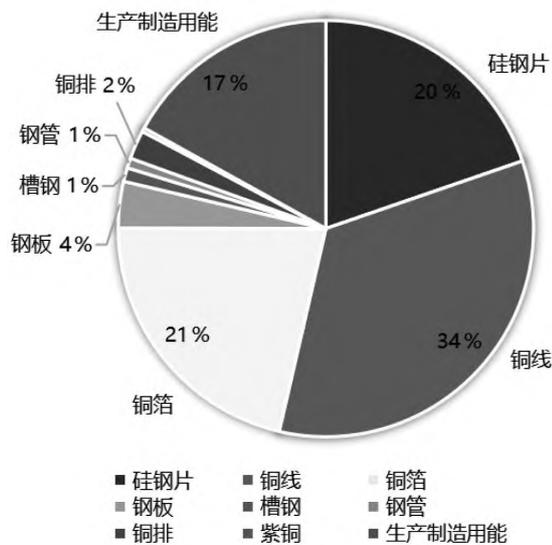
在全生命周期评价中，不确定性广泛存在^[9]，一般会占到全部排放数据的(5~20)%^[10]。因此，在计算出变压器各部分的碳排放量后，需要进行不确定性分析以确定结果的不确定度，进而提高计算结果的可靠性，主要包括：



(a) 100 kVA/10 kV 二级能效变压器

(b) 200 kVA/10 kV 二级能效变压器

图 5 10 kV 油浸式变压器碳足迹组成



(a) 800 kVA/10 kV 二级能效变压器

(b) 1 250 kVA/10 kV 二级能效变压器

图 6 10 kV 干式变压器碳足迹组成

1) 碳排放模型和计算范围的确定: 有些活动数据难以收集或者影响较小被排除在模型外, 也会一定程度上降低数据的可信度; 本研究仅计算了 CO₂ 一种温室气体, 未考虑其他温室气体如 CH₄、N₂O 对碳足迹结果的影响。

2) 排放因子的不确定性: 研究采用的数据库会存在缺省数据与实际情况存在偏差、数据库不完整等问题。可通过现场实测、改进碳排放模型、调整系统边界等措施来降低不确定性。

3.4 计算结果应用

1) 为产品碳足迹量化评审提供统一标准

通过碳足迹核算模型的计算得出各类数据对碳足迹的影响程度, 确定供应商在招标采购中需要提供的标准数据模板, 形成供应商碳足迹核算报告标准范本, 可进一步统一变压器碳足迹评价的标准。

2) 确定高碳排放单元

通过碳足迹核算模型可计算出各阶段的碳排放量并进行特性分析, 可帮助确定排放较高的零部件、模块单元和生命周期阶段; 有针对性的采取措施从产品设计到材料的选择、工艺、供应链等方面来实现产品的低碳化, 同时为形成典型电网物资产品碳足迹的权威数据库奠定基础。

3) 确定减少变压器碳排的关键措施

根据碳核算模型对变压器的碳足迹核算结果, 确定减少国网冀北电力有限公司变压器碳排的关键措施包括以下几点: 通过各种措施(产品设计或开发、替代材料)影响变压器的生产过程^[6]; 通过与二氧化碳贡献率较高的供应商沟通, 实现工艺中的能源替代, 如建议供应商在运输货物时使用清洁能源燃料等; 增加从碳足迹较小的主要供应商购买变压器的比例。

4 结论

以国网冀北电力有限公司供应商所提供的变压器数据为基础, 构建了一个基于全生命周期的产品碳足迹评价流程和评估模型。

1) 根据碳足迹核算模型计算结果, 油浸式变压器的

容量对铜线及硅钢片的碳排放量影响较大, 干式变压器的容量对铜箔、硅钢片与生产组装用能的碳排放量影响较大, 可根据碳足迹结果进一步探索变压器的碳减排方法。

2) 模型可有效地计算产品碳排放, 形成供应商碳足迹核算报告标准范本, 得到不同类型变压器碳足迹组成及变压器容量不同时各零部件生产过程碳排放的变化, 明确碳减排重点关注单元, 为形成典型电网物资产品碳足迹的权威数据库奠定基础, 有助于实现产品的低碳化。

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]. 浙江大学, 2014.
- [2] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological economics, 1999, 29(3):375-390.
- [3] Heller J E, Löwer M, Feldhusen J. Requirement based Future Product Cost Estimation using Lifecycle Assessment Data[J]. Procedia CIRP, 2014, 15:520-525.
- [4] Zheng H, Yan Y. Research on Carbon Footprint Analysis Model of Mechanical and Electrical Products from the Perspective of LCA: Proceeding of the 24th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2018, Singapore, 2019 [C]. Springer.
- [5] He B, Wang J, Huang S, et al. Low-carbon product design for product life cycle [J]. Journal of engineering design, 2015, 26(10-12):321-339.
- [6] Šerkinić V, Majić Renjo M, Učović V. CO2 footprint for distribution oil immersed transformers according to ISO 14067:2018 [J]. Journal of Energy - Energija, 2020, 69(3):3-9.
- [7] 郑辉, 王玎, 方丽霞. 生命周期评价视角下的机电产品碳足迹分析模型研究 [J]. 天津科技大学学报, 2017, 32(6):65-72.
- [8] 王欣, 李文强, 李彦. 基于生命周期的机电产品碳足迹评价与实现方法 [J]. 机械设计与制造, 2016(5):1-4.
- [9] 陈莎, 李姝佩, 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, 34(4):1067-1072.
- [10] 彭鑫. 基于碳足迹特征的机电产品方案设计建模及碳足迹评价研究 [D]. 山东大学, 2019.

作者简介:

毕子健 (1984-) 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为物资管理。