

机电产品碳足迹评估方法研究综述

Review on carbon footprint assessment methods of electromechanical products

王玲¹ 张光立² 姜丰²

WANG Ling¹ ZHANG Guangli² JIANG Feng²

1. 中国电器科学研究院股份有限公司 广东广州 510300;

2. 合肥工业大学机械工程学院 安徽合肥 230009

1. China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd. Guangzhou 510300;

2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology Hefei 230009

摘要: 低碳制造是可持续发展的必然途径。低碳制造技术是实现中国制造业转型的重要方法和手段。针对碳足迹评估方法的应用现状,搜集并分析国内外相关领域的文献,对当前研究的成果进行总结,并分析碳足迹评估的核心技术点及存在的若干问题,以进一步推动机电产品低碳制造技术的发展与应用。

关键词: 机电产品; 低碳制造; 碳足迹评估

Abstract: Low-carbon manufacturing is an inevitable way for sustainable development. Low-carbon manufacturing technology is an important method and means to realize the transformation of China's manufacturing industry. In view of the application status of carbon footprint assessment methods, collects and analyzes the relevant literatures at home and abroad, summarizes the current research results, and analyzes the core technology points and existing problems of carbon footprint assessment, so as to further promote the development and application of low-carbon manufacturing technology for mechanical and electrical products.

Keywords: Electromechanical products; Low carbon manufacturing; Carbon footprint assessment

中图分类号: TB472

DOI:10.19784/j.cnki.issn1672-0172.2022.06.009

0 引言

作为世界上最大的发展中国家,我国工业的快速发展虽然促进了经济和社会的增长,但也导致了严重的环境污染。特别是在欠发达的经济体系中,工业活动会产生更大的环境外部性。因此,“低能耗、低污染和低排放”的生态概念在世界范围内获得了青睐。在低碳经济形势与大众发展的背景下,“高能耗、高污染、高排放”问题给当前制造业的发展带来了极大的困难与挑战。为实现国家自主贡献目标,我国针对重工业低碳发展制定了一系列规划。低碳技术的发展和 innovation 是提高能源效率和实现节能减排的基本手段。因此,制造企业实施的低碳技术创新符合当前的发展趋势。

1 碳足迹评估研究

碳排放是一个多物理学科的研究领域,它是对温室气体排放的一种简要概述。碳排放的温室效应以及国际上对气候变暖效应的政治反应已经引起了科学界的注意。此外,国内外研究人员对碳排放和碳减排的多视角、多学科理论解释和实证检验,为制定相关减少碳排放的政策提供了理论支撑。在这种政治和经济背景下,全球范围内与碳排放和碳减排相关的科学和经济研究日益增多。

产品碳足迹在学术上的定义是产品全生命周期各阶段运行过程中生产的温室气体排放量,但是现有的研究中对碳足迹的量化并没有形成普遍认可的评价计算方法。在各类产品的研究中,碳足迹均是

作者简介: 王玲(1970—), 博士学位。研究方向: 电器电子产品绿色制造领域。地址: 广东省广州市海珠区新港西路204号1号楼中国电器科学研究院股份有限公司。E-mail: 81982684@qq.com。

通讯作者: 张光立, E-mail: 2774263892@qq.com。

基金项目: 广州市科技计划项目(20212210004)。Guangzhou Science and Technology Plan Project (No.20212210004); 国家工业与信息化部2021年产业技术基础公共服务平台项目(2021-H028-1-1)。

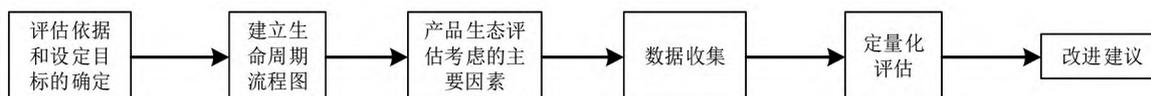


图1 典型碳足迹评估方案流程

基于ISO 14040系列的标准框架进行实施产品全生命周期的评价，这一系列的评价主要包括确定目标和范围、清单分析、影响评价以及解释说明。典型的碳足迹评估方案流程如图1所示。

碳足迹影响因素的分解模型较多，不同评估模型的提出是基于不同的思路，但是都有相同的基础模型。随着国内碳足迹评估研究的逐渐深入，国内学者从不同的角度、对象和方法对其进行研究。其中，碳足迹评估的准确性与未来机电产品应缴纳的碳税额度相关联，故此碳足迹评估的准确性研究是碳足迹量化的重点研究内容之一。

为了实现碳减排，许多研究人员通过建立一系列的碳排放相关模型来计算碳排放量，为后续碳排放优化提供更加便利的条件。虽然目前对碳排放量的计算方法有很多种，但是使用最多的有生命周期法（Life Cycle Assessment, LCA）、投入产出法以及IPCC法（Intergovernmental Panel on Climate Change）。基于LCA的碳足迹评估计算流程如图2所示。

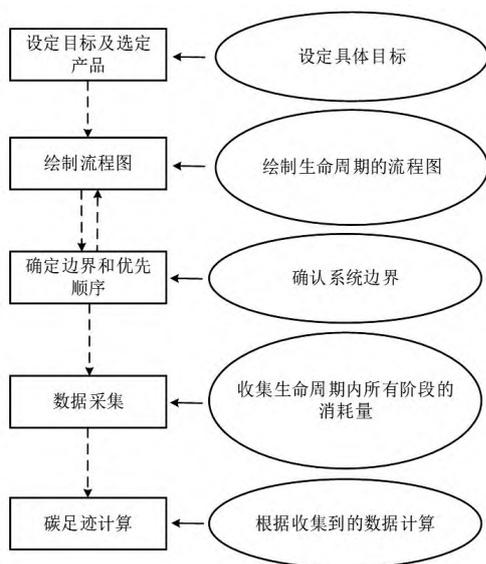


图2 基于LCA的碳足迹评估计算流程

1.1 LCA 法

LCA法是核算产品在其全生命周期或者整个阶段中所有投入和产出对环境造成影响的方法。LCA是通过生命周期清单所得研究对

象的输入、输出清单，计算其全生命周期中直接和间接产生的碳排放，建立“输入=累积+输出”的平衡方程式。

Jeswiet等^[1]提出了一种将制造中使用的电能直接与使用电能产生的碳排放（CE）联系起来的方法，使用碳排放签名（CESTM）查找零件碳排放量；Maria等^[2]通过考虑七种冲击方法，对电动汽车动力总成的关键部件进行详细的生命周期分析，结果表明，高能资源消耗产生的影响最大，其次是金属，最后是矿产资源。Hoang等^[3]基于生命周期提出一种可持续算法来求解最小二氧化碳的排放量，与传统方法相比，优化后的碳排放总量减少了5.3%~17.7%；王欣等^[4]针对产品碳足迹评估计算问题，通过建立碳足迹评价流程实现对产品整个运行过程的全面理解，分析影响产品碳排放因素并制定减排关键措施；Chen等^[5]根据自行车生产、运营和回收过程中消耗的资源量，利用生命周期碳排放评估来计算共享单车行业的减排阈值，为探索共享经济与环境之间的关系提供了新的视角；Wei等^[6]在生命周期评估的基础上评估轧钢生产产生的水、碳和化石能源足迹，并查明了归因于这些环境影响的主要贡献者，以便探讨其潜在的缓解措施，最后使用蒙特卡罗模型进行不确定性分析，为决策提供可靠的结果。吴百苗等^[7]基于全生命周期（LCA）框架，建立全生命周期碳足迹、环境、经济综合影响评价模型（LCA-CEE）；刘涛等^[8]提出应用生命周期评价（LCA）对钢铁企业低碳发展规划的方法。

采用基于生命周期的评价方法，可以更好地从产品的全生命周期阶段，更加全面地评估碳足迹。但是对于LCA来说，数据的获取是关键，而在实际过程中，很难具体获取到各个过程的初始数据，并且很难将所有影响因素考虑进去，从而影响到碳评估的准确性。

1.2 投入产出法

投入产出法也称投入产出分析，是研究经济活动中各产业之间、各企业之间、企业内部各工序之间或各产品之间投入量与产出量平衡关系的一种方法。通过统计企业各部门温室气体排放，利用投入产出法分析在整个生产链上产生的温室气体碳排放量。

徐恺飞^[9]基于全球国家为了应对日益严重的环境问题而调整经济模式的大背景和中国产业结构现状的考虑，测算完全碳排放，从而对碳排放的驱动因素进行分析；杨璐瑶^[10]建立了实物量的区域间公路货运投入产出表；Yang.W等^[11]采用投入产出分析和生态网络分析，从系统角度探讨如何减轻企业信息门户（Enterprise

Information Portal, EIP) 产品或服务中体现的碳排放, 该研究可能有助于EIP的低碳管理; Wiedmann等^[12]在经济学中基于产品生命周期提出一种投入—产出法, 并且讨论该方法在碳足迹评估中的适用性。除此之外, 孙良峰等^[13]采用相对碳排放因子方法构建低碳设计产品结构多层集成模型, 形成一种从上向下的分层递减排放表达机制, 该模型可以较好的对设计过程中碳足迹的量化进行实时反馈; Alessandro等^[14]为了提供一种全新的多标准优化方法, 基于生命周期评估的可持续性定量分析与公司成本评估方法相结合, 并进行实验, 结果表明: 将该方法用于燃气轮机的单个组件, 从而降低了供应成本和温室气体排放; Jiang等^[15]从投入产出调研的角度出发, 采用投入产出法、结构分解法、能源利用法的扩展形式, 对2007—2015年我国电力和供热行业结构性排放减少情况进行了研究, 为电力供热行业从投入输出角度控制CO₂排放增长提供假设分析依据, 也为电采暖行业更精准地减少供给侧能源品种排放提供准确路径; Zhu等^[16]提出了各个国家间投入产出分解框架, 该框架可以区分国内企业和多国企业, 并重新计算全球价值链排放量, 包括国际贸易(与贸易有关的全球价值链排放)、外国直接投资(与外国直接投资有关的全球价值链排放)和两者(与贸易和与外国直接投资有关的全球价值链排放)所体现的排放量。

由上述研究发现, 基于投入产出法的碳足迹评估研究主要集中在区域、集团、产业等宏观方面, 很少应用到机电产品上, 因此, 投入产出法在碳足迹评估上的应用还具有很大的研究空间。投入产出法的相关研究在我国起步较晚, 无论是技术还是经验上都落后于欧美国家。并且由于我国的区域经济差异, 导致数据缺乏可靠性, 进而导致分析结果产生系统误差。

1.3 IPCC 法

IPCC法是一种通用型的核算方法, 该方法适用于不同尺度的碳足迹核算, 其通用公式为: 碳排放量=活动数据×排放因子。

在IPCC法方面, 国内外的学者做了一些研究, 其中Jun Peng等^[17]针对机电产品中碳足迹分析与设计方法中结构难以与低碳设计相结合的问题, 提出一种基于能源矿物燃烧排放量(IPCC法)的碳足迹评估方法, 通过实验验证了该方法的有效性; 李涛等^[18]针对数控机床中碳足迹评估问题, 提出基于能源消耗构建碳足迹评估模型, 并且对设计方案进行绿色度评价, 该模型用于五轴联动立式加工中心的设计中进行评估, 验证了该方法的有效性; Giulia等^[19]针对奶酪生产机器中碳足迹和水足迹评估问题, 采用IPCC2013的方法对机器在生产过程中的碳足迹进行评估计算, 结果表明, 该方法的使用可以有效地计算机器运行过程中的碳排放量; 徐峰等^[20]针对谷物联合收割机的燃油消耗问题, 运用IPCC法评估出碳减

排; 吴汉栋等^[21]针对燃煤火电行业中发电机组的碳排放量评估, 提出基于IPCC法的碳足迹评估方法, 以300 MW亚临界燃煤发电机组为例, 并利用工程数据计算该机组年度二氧化碳的排放量, 并指出了IPCC法在计算过程中的优点; Maurizio Cellura等^[22]针对城市能源消耗对环境的影响问题, 应用IPCC与LCA的方法对城市中碳排放量进行评估计算, 研究表明, 通过IPCC方法计算温室气体的排放量减少约7%。

以上对机电产品的研究中主要是利用IPCC法对机电产品运行过程中的碳足迹进行评估计算, 可以根据清单因子对生产过程进行精确的碳排放量计算; 但是现有的研究中针对机电产品使用过程中利用IPCC法进行碳足迹评估的研究很少, 主要是针对城市、畜牧业、林场等使用IPCC法进行碳足迹评估。因此, 还需要针对机电产品加大相关研究力度。

以上均是针对如何进行碳足迹评估方法的研究, 研究主要集中在LCA法、投入产出法、IPCC法。每种方法都有着其本身的优点和局限性, 如何通过充分利用和完善改良碳足迹评估的方法来提升产品碳足迹评估的准确性, 在未来的研究中将变得至关重要。

2 机电产品碳足迹评估研究的热点、难点及存在的主要问题

2.1 机电产品碳足迹评估研究的热点

结合前面所论述的内容, 制造业目前迫切需要满足资源环境压力下的绿色与低碳需求, 因此, 国内外企业及研究机构开展了对应的机电产品碳足迹评估领域内研究, 主要涵盖工程机械、电子电器、机械装备等多种机电产品领域。

目前, 碳足迹评估研究热点主要是集中于针对某类具体产品的碳足迹模型, 制造过程中某个具体过程或技术的碳排放分析, 以及各类产品生命周期阶段的碳数据分析与评估。但距离从产品顶层设计或制造系统规划等系统层面出发的碳信息体系、碳评估技术及低碳设计仍存在一定差距。

2.2 机电产品碳足迹评估研究的难点

目前, 机电产品的碳足迹评估涵盖了多个领域与学科, 如产品设计、信息处理等, 其中重点关注内容复杂, 且存在一定的技术冲突, 其相关研究面临诸多难点:

(1) 碳足迹数据搜集及准确性

机电产品涉及的零部件和原材料构成复杂, 将产品零部件拆解得到各零部件碳足迹的数据搜集工作量巨大、准确性难以保证, 且碳足迹数据包含但不限于原材料的开采、产品的设计、制造、运输、销售、使用、维修保养、废弃处理, 涉及到生命周期各个阶段, 是机电产

品实施碳足迹评估最主要的难点之一。

(2) 碳足迹模型构建

由于机电产品所选用原料多源、制造过程复杂、服役环境不确定、回收方式多样等各类影响因素,导致构建生命周期下碳足迹模型难度较高,且其模型分析精度较低,无法有效支撑后续的碳足迹分析及优化目标。因而,构建准确的数学或物理过程模型来描述机电产品全生命周期碳足迹分布规律存在较大的困难。

(3) 碳足迹评估

由于要合理评估机电产品的碳足迹,采用对应的减碳技术来优化关键环节,一般需要花费一定的时间和人力成本,形成长时间和大范围的反映碳排放影响因素与其碳足迹之间对应的关系,并积累相应的数据,以实现机电产品的全球碳足迹评估,实现有效的减碳优化,这也是目前低碳制造中比较复杂的研究领域。

2.3 机电产品碳足迹评估存在的主要问题

结合上文所述,尽管研究人员针对不同机电产品提出了各种碳足迹评估方法,且以上碳足迹评估方法具备各自优势,但在具体实践与工业化应用中仍面临诸多困难:

(1) 碳足迹数据缺失

国内碳足迹核算标准体系和数据库缺失。近几年,我国包括机电产品在内的产品在出口欧洲国家时遭遇了绿色碳壁垒,越来越多的企业在建立数据库,但现阶段尚未建立统一的数据库,没有推动国际互相认可,缺乏客观反应我国生产技术水平、具有时间地域代表性的高质量碳足迹排放因子数据。

(2) 生命周期数据共享

机电产品碳足迹的有效分析与评估是基于其高质量生命周期数据之上的,而部分核心数据,尤其是企业内部运行与产品研发数据,其使用权限是受到约束的,迫切需要解决机电产品生命周期数据使用、管理及共享问题。

(3) 规范及监管平台

由于机电低碳制造技术体系关系到国家社会的多个层面,如能源行业、居民生活等,其关键技术应用效果会进一步影响至各个环节,如新材料应用、资源循环、新能源替代等,在其实施过程中需要得到相关标准及规范指导,以及相关部门的有效推动及监管。

3 总结

节能减排是依据可持续发展战略而提出的新生产理念。由于资源稀缺和环境立法,生产机电产品的相关企业面临着愈来愈多的压力,并且随着社会的发展,能源与供给需求的矛盾愈发严重。因此,碳足迹评估与低碳技术对相关制造企业进行技术升级革新,是不可

或缺的一种措施。通过分析上述研究成果,展示了碳足迹评估的研究现状、技术特征、研究热点及当前问题,以进一步推动机电产品低碳制造技术的发展与应用。

参考文献

- [1] Jeswiet J, Kara S. Carbon emissions and CES in manufacturing[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2008, 57(01): 17-20.
- [2] Maria Hernandez, Maarten Messagie, Michele De Gennaro, Joeri Van Mierlo. Resource depletion in an electric vehicle powertrain using different LCA impact methods[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 120: 119-130.
- [3] Trinh Hoang Tran Mai Kim, Chowdhury Sanaul, Nguyen Minh Tuong, Liu Tingting. Optimising flat plate buildings based on carbon footprint using Branch-and-Reduce deterministic algorithm[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128780.
- [4] 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(05): 1-4.
- [5] Jingrui Chen, Dan Zhou, Yue Zhao. Life cycle carbon dioxide emissions of bike sharing in China: Production, operation, and recycling[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 162: 105011.
- [6] Wei Chen, Qian Zhang, Chengxin Wang, et al. Environmental sustainability challenges of China's steel production: Impact-oriented water, carbon and fossil energy footprints assessment[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108660.
- [7] 吴百苗,张一梅,栗帅,等. 基于LCA的污水处理方案碳中和综合影响评价[J]. *环境工程*, 2022, 40(06): 130-137.
- [8] 刘涛,刘颖昊,周焯. 生命周期评价方法在钢铁企业低碳发展规划中的应用[J]. *中国冶金*, 2021, 31(09): 130-134.
- [9] 徐恺飞,金维红. 基于投入产出法的中国制造业碳排放研究[J]. *时代金融*, 2020(09): 105-106.
- [10] 杨璐瑶. 基于投入产出法的区域间公路货运碳排放动态研究[D]. 成都:西南财经大学, 2020.
- [11] Yang W, Wang S, Chen B. Embodied carbon emission analysis of ecoindustrial park based on input-output analysis and ecological network analysis[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3102-3107.
- [12] Wiedmann T. Carbon footprint and input-output analysis-an introduction[J]. *Economic Systems Research*, 2009, 21(03): 175-186.
- [13] 孙良峰,裴乐淼,张树有,等. 面向低碳化设计的复杂装备碳排放分层递阶模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(11): 10.
- [14] Alessandro Musacchio, Pietro Bartocci, Angela Serra. Decarbonizing materials sourcing and machining in the gas turbine sector, through a cost-carbon footprint nexus analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127392.
- [15] Jiang T y, Yang Yu, Atif Jahanger, et al. Structural emissions reduction of China's power and heating industry under the goal of "double carbon": A perspective from input-output analysis[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022(31): 346-356.
- [16] Zhu K f, Xuefan Guo, Zengkai Zhang. Reevaluation of the carbon emissions embodied in global value chains based on an inter-country input-output model with multinational enterprises[J]. *Applied Energy*, 2022(307): 118220.
- [17] Jun Peng, Wenqiang Li, Yan Li, et al. Innovative product design method for low-carbon footprint based on multi-layer carbon footprint information[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 729-745.
- [18] 李涛,杨庆东,祝英平. 基于碳足迹方法的数控机床绿色度评估[J]. *制造技术与机床*, 2016(12): 33-35.
- [19] Giulia Borghesi, Roberta Stefanini, Giuseppe Vignali. Life cycle assessment of packaged organic dairy product: A comparison of different methods for the environmental assessment of alternative scenarios[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 318: 110902.
- [20] 徐峰,李君略,刘声春,彭俊明,程俊男. 谷物联合收割机节能减排潜力评估和技术路径研究[J]. *农机化研究*, 2019, 41(01): 1-8.
- [21] 吴汉栋,韩巍,高林. 燃煤火电机组碳足迹因子分析与案例研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(04): 690-694.
- [22] Cellura M, Cusenza M A, Longo S. Energy-related GHG emissions balances: IPCC versus LCA[J]. *Science of the Total Environment*, 2018(628): 1328-1339.

(责任编辑: 马冀圆)