

面向低碳制造的冰箱 CMF 设计碳足迹核算研究

张琳, 王永强*, 李雪瑞
(山东科技大学 艺术学院, 山东 青岛 266590)

摘要: **目的** 构建冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统, 为企业实现冰箱 CMF 设计低碳制造和节能减排提供工具支持。**方法** 以产品碳足迹核算流程为依据, 确定家用冰箱 CMF 设计过程中的碳排放源, 综合考虑冰箱面板加工过程中的碳排放影响因素, 建立碳足迹核算模型, 并基于计算和数据管理两个维度, 构建冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统。**结果** 成功构建了冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统。**结论** 通过对冰箱 CMF 设计方案进行碳排定量分析, 按照碳评价结果, 对冰箱 CMF 设计方案进行优选, 并对生产工艺过程进行绿色低碳优化, 从而对冰箱的低碳设计决策产生前瞻性的指导意义。

关键词: 低碳设计; CMF 设计; 碳足迹核算; 冰箱设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)22-0092-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.22.011

Carbon Footprint Accounting of CMF Design for Low Carbon Manufacturing Refrigerator

ZHANG Lin, WANG Yong-qiang*, LI Xue-rui
(College of Arts, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to construct a carbon footprint accounting system for low-carbon designed CMF of refrigerators and to provide tool support for enterprises to achieve low-carbon manufacturing and energy-saving emission reduction through CMF design. First, based on the carbon footprint accounting process of product, the carbon emission sources in the CMF design process of household refrigerators were identified. Then, taking into account the carbon emission factors of the refrigerator panel processing, a carbon footprint accounting model was established. Finally, a low-carbon designed CMF carbon footprint accounting system for refrigerators was constructed based on the dimensions of calculation and data management. Through the carbon quantification analysis of the CMF design scheme for refrigerators, the study optimizes the CMF design scheme according to the carbon evaluation results, carries out green and low-carbon optimization of the production process, and provides forward-looking guidance for low-carbon design decisions on refrigerators.

KEY WORDS: low-carbon design; CMF design; carbon footprint accounting; refrigerator design

碳达峰、碳中和将变革性重构整个制造业, 加速制造业产业链的转型升级, 促进我国制造业产业的创新、协调、绿色、开放, 以及融合发展。随着资源、能源和环境对我国制造业发展的制约逐步增强, 制造业亟须低碳转型^[1]。数字化赋能产品生命周期管理与碳足迹追踪分析评价便是制造业低碳转型的重要路径之一。产品生命周期管理是对在原材料提取、设计、

制造、运输、销售和处置过程中碳排放的量化。在产品碳排放核算的研究中, 支持流程及工艺优化, 对产品进行生态设计, 而碳足迹计算方法也成为实现低碳制造的定量分析评估手段。产品碳足迹核算数据成为未来征收碳税和顾客选购产品的重要依据, 降低产品碳排放对提升产品在未来低碳市场的竞争力有着关键作用。

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 2020 年山东科技大学教育教学研究“群星计划”项目 (QX2020M69)

*通信作者

在“双碳”目标的驱动之下, 低碳制造所具备的降低能源消耗、减少碳排放、提高能源利用率等特点已成为各国研究人员关注的焦点。以低碳制造为目标的相关领域的学者正在各个领域开展广泛的研究, 为实现制造业的低碳目标提供理论框架。在低碳制造方面, Cai^[2]介绍了面向生命周期的机械制造企业低碳运营流程框架模型, 并从目标体系框架、低碳运营战略、生命周期流程和支撑体系四方面探讨了机械制造企业低碳运营多维流程模型的构建过程。Zheng 等^[3]提出了基于知识的集成产品设计框架, 以支持低碳产品开发, 并在此基础上, 提出了一种基于案例推理的功能结构综合方法, 以缩小设计空间, 生成适合于实现所需功能的设计方案。Aydin 等^[4]提出了一种考虑多生命周期方法和 EoL 恢复策略的可持续产品线设计新方法, 从而建立了以经济性能、环境性能为目标的优化模型, 确定了新产品和混合产品的设计与销售价格。王力^[5]提出了绿色设计方法的概念, 强调了机械设计和生产中绿色设计的必要性, 从发散设计、绿色设计方案的制定、绿色设计规范和标准的制定、机械设计材料的选择与制造这四个方面分析了绿色设计的具体应用。潘毅^[6]为了解决冰箱内胆制造过程中, 预加热工位和加热工位的温度场能量损耗大、保温措施不充分等问题, 基于传热学基础理论, 使用热传导、热辐射、热对流等基本方法建立了预加热工位和加热工位中聚合物板材加热的能耗模型, 并且运用 MATLAB 仿真技术验证了模型的正确性, 从而减少了生产线电能的损耗, 提高了该生产线的工作效率, 大大减少了原材料的浪费, 实现了冰箱内胆制造工位的高能效低碳制造。在低碳产品设计方面, 张城等^[7]提出了一种基于商空间理论的静态碳排放计算方法和基于多情景分析的碳排放关键因素识别方法。鉴于碳核算过程的有效性和核算结果的通用性, 通过确定产品生命周期中碳排放的主要阶段和驱动因素, 并采用空调产品的碳排放为例进行核算, 以论证该方法的可行性和有效性。裴国阳^[8]以家用电器为研究对象进行家电模块化设计, 采用绿色设计思路, 并提出了一种绿色模块化的家电设计方法, 在实施家电快速设计的基础上, 进一步增加了产品的环保性。张吉春等^[9]根据产品生命周期的概念和制造业的发展趋势, 基于 JSP 和 MySQL 等技术, 开发了产品生命周期评估系统和绿色产品设计系统平台。孙俊军等^[10]总结和改进了企业的环保包装管理策略, 以促进创新, 构建了基于产品全生命周期的纸包装绿色发展模式的基础, 实施了企业环保包装管理的创新实践, 提出了基于产品全生命周期的纸包装企业绿色发展模式。刘英会^[11]针对电冰箱的生命周期过程, 建立了电冰箱的绿色度评价指标, 用于评估冰箱的绿色程度并分析结果, 从而将电冰箱的绿色评价与生产使用回收过程紧密结合起来。

综上所述, 从制造业到具体的工业产品设计, 相关学者从不同角度阐述了低碳制造理论及低碳制造方法, 在制造业领域形成了相对完整的低碳评估体系。然而, 相关研究所提出的理论模型及方法过于宏观, 主要侧重于宏观的全生命周期的产品碳排放建模、分析和计算, 碳排放分析和特定产品微系统研究相关的文献很少, 也缺乏用定量方法为关键模块化产品设计单位制定最佳的低碳设计改进方案。本文从冰箱 CMF 设计和其全生命周期的分析框架出发, 提出冰箱 CMF 设计碳足迹分析模型, 并构建冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统框架, 为冰箱 CMF 模块单元低碳设计提供参考。

1 冰箱面板 CMF 设计碳排分析

家用冰箱通常由四部分组成: 箱体、冷却系统、电气系统、配件。一台冰箱的碳足迹就是指从“摇篮”到“坟墓”, 即从冰箱在原材料制备到废物回收全生命周期中直接或间接产生的碳排放总量, 钣金面板冰箱生产制造大致流程见图 1。冰箱的 CMF 设计集成在冰箱箱体, 而箱体所呈现的就是独具一格的外观, 现有冰箱面板的材料及其特征见表 1。从表 1 可知冰箱的面板材质主要分为三大类: 金属钣金面板, 是早期最常见的冰箱面板, 在钢化玻璃面板大范围应用之前, 绝大部分的冰箱都是金属钣金面板, 现在市面上金属钣金面板的冰箱依旧占据着半壁江山; 玻璃面板; 新型材料面板。箱体面板的材料、色彩、加工工艺的异同, 会导致冰箱整体造型、价位、优劣的异同, 与此同时, 不同的 CMF 设计方案也会导致碳排放量的不同。

基于产品全生命周期过程建立碳排放特性, 一般以产品从“摇篮”到“坟墓”作为研究边界。在冰箱 CMF 设计维度, 冰箱面板基材作为色彩和表面处理工艺的载体, 是首要的碳排放考量因素; 面板的加工

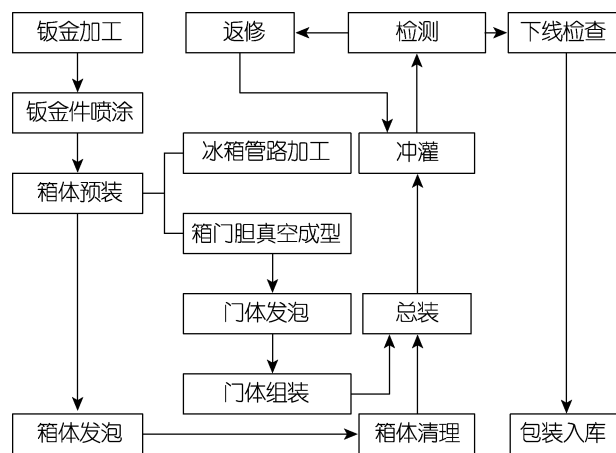


图 1 冰箱钣金面板生产制造流程
Fig.1 Production and manufacturing process of refrigerator sheet metal plates

表 1 冰箱面板材料
Tab.1 Refrigerator panel materials

冰箱面板	特征
PCM 彩涂板	彩色预涂板，表面采用家电环保涂料，售价相对 VCM 来说比较低廉。
VCM 覆膜板	一般选用钢板或者镀锌钢板作为基体，覆有彩色的花纹层，表面平滑，颜色效果好，但单价格较昂贵，所以通常用作冰箱的面板
PVC 金属拉丝	PVC 板被称为金属拉丝面板，尺寸适中，颜色更均匀，并且比 PCM 板更美观、更耐用
不锈钢面板	不锈钢冰箱面板价格高，不易变形，非常耐用，但花纹很少，指纹容易附着，成本较高
彩晶玻璃面板	彩晶玻璃是将彩色涂层、树脂，以及塑料色粒层叠在玻璃上，经过处理制成的新型装饰材料。更侧重的是面板的美观度，会比较鲜、亮、闪等
钢化玻璃面板	硬度很高，耐磨性也强，容易留下指纹。除了具有玻璃面板的优点外，还集美感、光感、触感于一体，其光感更柔和、触感更细腻

成型工艺是碳排的关键因素，直接排放有原材料的消耗、加工工艺耗材（切削液等），间接排放有电能和其他能源的消耗。在考虑冰箱 CMF 设计方案生产加工的碳足迹之前，首先要在生产加工过程的结构方案中明确每个过程中各种能源和材料的直接或间接消耗，这是冰箱 CMF 设计碳排放的重要组成部分^[12]。

冰箱面板 CMF 设计首先要界定产品生产系统及各个阶段，整体划分为原料获取、制造、物流运输和使用阶段。每个阶段的具体工艺步骤和相关碳排放来源需要明确地进行识别，构建清晰的排放清单，同时评估每个来源的排放因子并转换为 CO₂ 当量，并计算出各阶段总体的碳排放量。综合不同阶段的碳足迹结果，以提供冰箱面板 CMF 设计整体生产过程的碳排放数据，从而识别出主要排放来源。这为实施最高效的减排措施奠定了基础。

2 冰箱 CMF 设计过程碳足迹核算模型

2.1 冰箱 CMF 设计碳足迹核算边界的确定

冰箱 CMF 设计碳足迹核算见图 2，根据国际标准 ISO 14067《碳足迹核算和报告指南》的要求，碳

足迹核算阶段分为启动阶段、实施阶段，以及延续阶段^[13]。这三个阶段覆盖了整个碳足迹核算的过程，能够全面地评估产品或服务的碳足迹，并为制定减排计划和实施减排措施提供支持。对于产品，其生命周期可被视为一个系统。生命周期的每个阶段可以视为一个单元过程，该产品系统的边界是由每个单元过程中影响此过程的碳排放因素所确定的^[14]。如图 3 所示，从“摇篮”到“摇篮”的每一个阶段都可视为作为一个独立的系统，每一个微系统都有相应的系统边界。

在静态系统中，产品级碳足迹可以看作是在产品生命周期的每个阶段增加材料消耗和能源消耗的碳排放。冰箱 CMF 碳足迹核算边界，见图 4。通过对生命周期的分段和系统边界的定义，采用生命周期评估（LCA）用于量化每个阶段的碳排放量，以实现产品碳足迹的静态计算。这里生命周期边界划分为原材料和能源收集、生产、组装、使用、再利用和循环等五大过程，同时引入了基于过程的输入输出清单方法，并将整个系统的功能单元作为生产过程中每个功能单元流程的资源利用和能源消耗的共同依据，从而获取生产系统的每个单元过程全部的生产投入和产出信息。

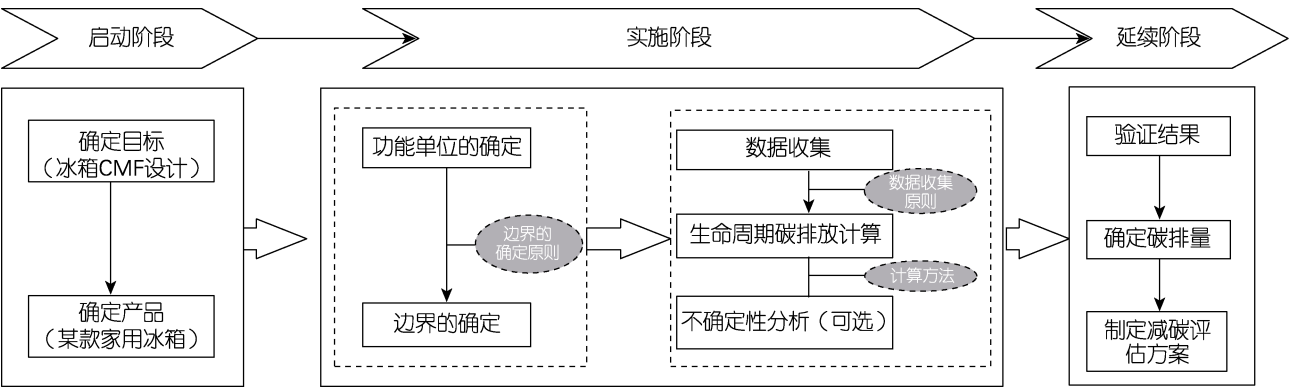


图 2 冰箱 CMF 设计碳足迹核算流程
Fig.2 Carbon footprint accounting process of refrigerator CMF design

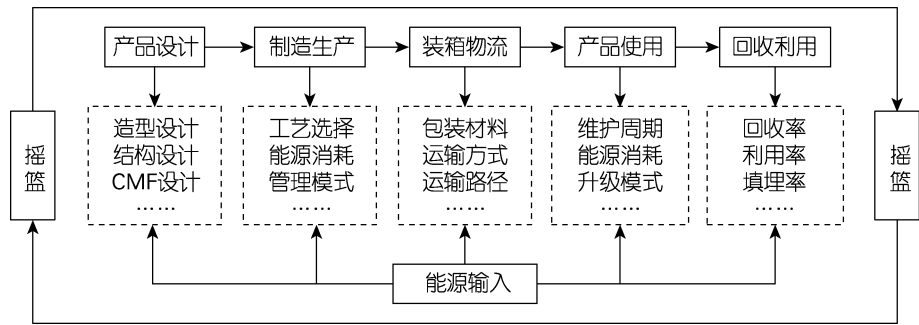


图 3 冰箱碳足迹核算边界
Fig.3 Carbon footprint accounting boundaries of refrigerators

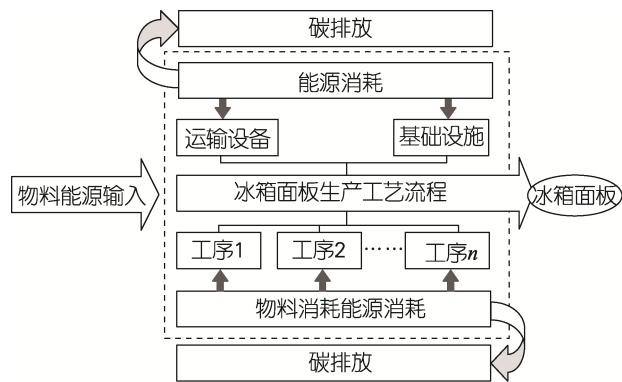


图 4 冰箱 CMF 设计碳足迹核算边界
Fig.4 Carbon footprint accounting boundaries of refrigerator CMF design

2.2 冰箱 CMF 设计碳排放源的确定

冰箱 CMF 设计阶段碳排是以原材料供应至面板

成品为边界区间，直接碳排指企业直接控制的燃料燃烧活动和物理化学生产过程产生的直接室温气体排放。典型的直接碳排涵盖了燃煤发电、自有车辆使用、化学材料加工，以及设备的温室气体排放。在冰箱 CMF 设计阶段的直接碳排可分为冰箱面板制造、原材料供应（选择、运输和储存）两大板块。其中，原材料供应又可根据材料类型分为原材料（面板基材、面板色彩涂料等）和价值链中的功能辅助原材料（冷却液、切削液等）。生产过程中的间接碳排来自电力、热力、蒸汽和冷气等。除上述直接碳排和间接碳排之外，价值链上下游各项活动的间接排放也需要作为碳排放源数据集的一部分被纳入考虑。如图 5 所示，冰箱面板的生产过程即为面板的生产工艺过程。以冰箱面板基材生产加工为起点，采用一定的表面处理工艺，使其成为冰箱面板成品的整个过程伴随着资源和能源的输入、废料和污染的输出，这就是一个碳排放的过程。

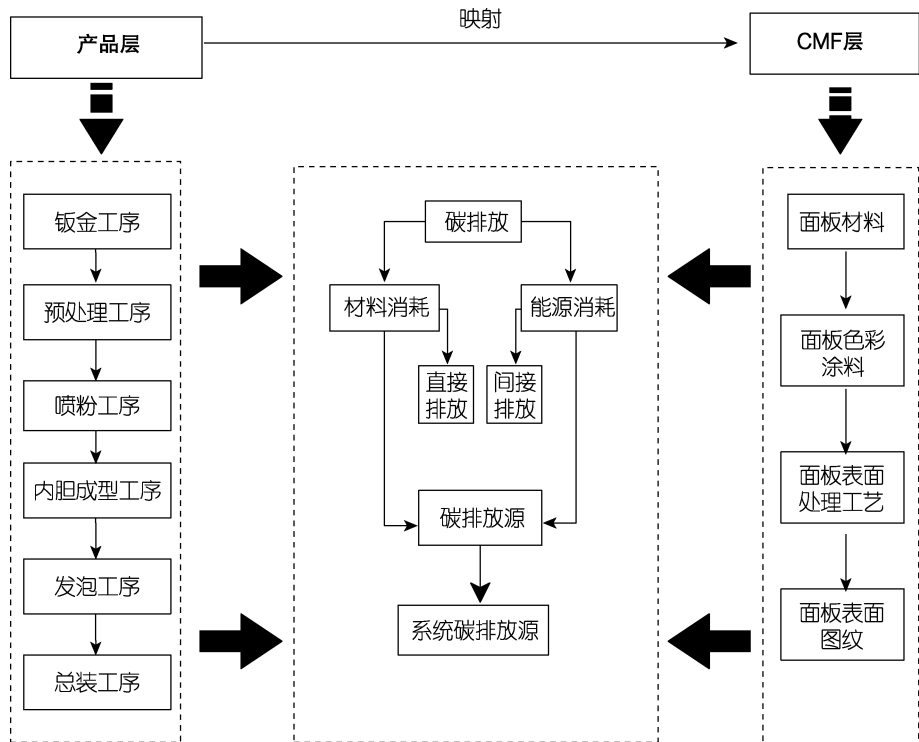


图 5 钣金冰箱面板碳排放源
Fig.5 Carbon emission sources of sheet metal refrigerator panels

2.3 冰箱 CMF 设计碳足迹核算模型

生产过程是将原材料转化为成品的过程,也可以视作是资源环境的引入和提取过程。引入过程为制造过程所涉及的物料(如面板基材、色彩涂料、清洗液等)、能源(电能等)等,通过原材料准备、生产、加工、安装调试等阶段,可以生产出质量合格的冰箱面板,在冰箱面板生产制造的过程中会有固体废料

(面板基材余料、切削液等化学垃圾)、废气、废水等排放物^[15]。如图 6 所示,冰箱面板在进行生产加工时,不同的 CMF 设计方案有着不同的物料能源损耗,按照不同的材料和表面处理工艺可以将碳排类型分为两类:成形工艺碳排放和表面处理工艺碳排放。物料损耗和能源损耗共同构成以这两种类型的碳排放源。

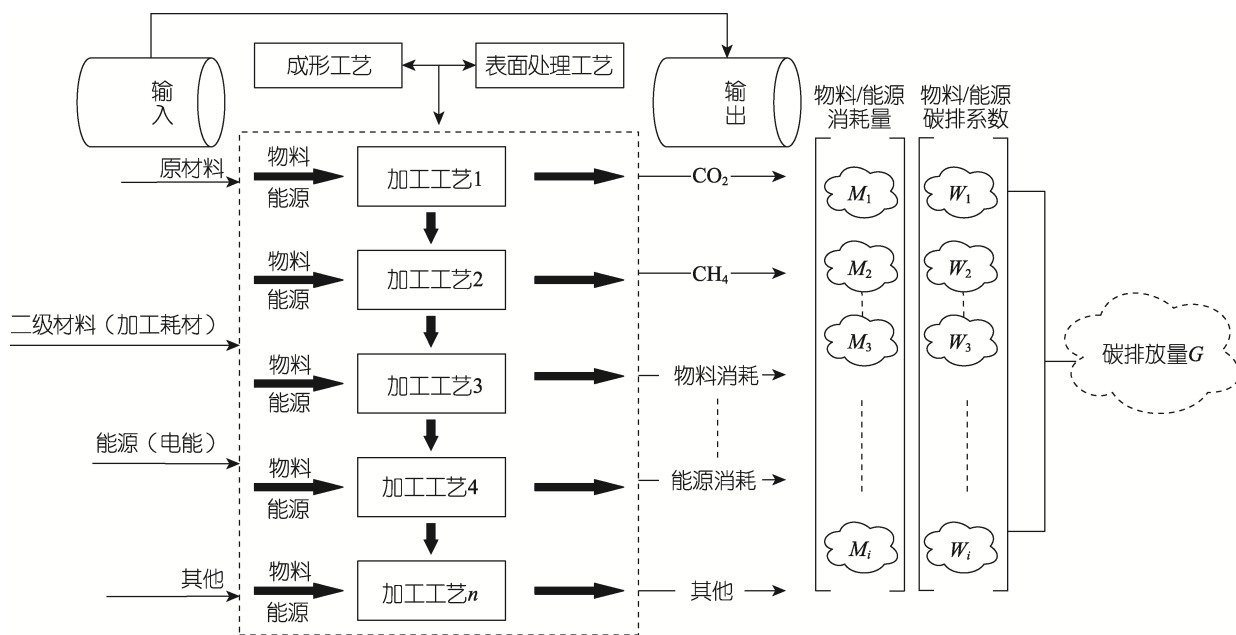


图 6 冰箱 CMF 设计碳足迹核算模型

Fig.6 Carbon footprint accounting model of refrigerator CMF design

数据收集具有高度关键性,但由于企业在制造过程中其环境特征和资源使用数据的多样性,使得数据收集的跨度较大。研究如何收集环境评估数据,并采用已经成体系的数据收集方法、装置和设备,结合环境评估模型的现实性需求,对数据提取、计算模型进行深层次的优化^[16]。对冰箱 CMF 方案生产过程的资源流、时间流、物料流,以及环境排放源进行全面定性分析,基于对资源流动的定量和定性分析,把碳足迹作为冰箱 CMF 设计生产的定量指标,对资源、能源和废物的碳排数据进行具体分析,以实现冰箱 CMF 低碳设计的要求^[17]。冰箱面板加工制造过程中会涉及到多因素碳排数据,假设冰箱 CMF 设计方案下工艺过程中涉及碳排相关的碳物料总数为 n ,各类物料损耗和能源损耗的排放系数为 W ^[18]。在冰箱 CMF 设计方案环节链系统边界和时间边界的限定下,可以求得冰箱 CMF 设计方案在生产过程的碳排放量 G ,具体计算见式(1)。

$$G = \sum_{i=1}^n M_i W_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

式中: G 为碳排放总量; i 为碳排放过程中第 i 个碳物料; n 为碳物料总个数; M_i 为生产活动中消耗的第 i 类物料的物理量; W_i 为第 i 类物料排放系数。

3 冰箱 CMF 设计碳足迹核算模型应用

以海尔冰箱某型号为例,面板颜色为深空灰,面板材质为 PCM,宽和高分别为 908 mm 和 1 905 mm。所谓 PCM (Prepainted Steel Sheet) 彩涂板主要是指通过辊涂方法在各种金属卷料上涂上一层或多层涂料,再经高温烤制而成的复合材料。PCM 彩涂板主要应用在建筑钢结构厂房的库房建筑、内外墙饰面、五金产品家电外壳、汽车运输设备、教育教学,以及家具与办公设备等方面。PCM 家电彩涂板的具体工艺流程如图 7 所示。

这款冰箱 PCM 面板基材为钢板,获取面板钢材质量后,可以通过核算模型计算出面板原材料的碳排放量,以确保冰箱面板生产过程碳足迹核算的准确性。若将人工操作和管理相关碳温室气体排放被纳入考虑,则会增加额外的不确定性。因此,本研究专注于生产过程本身的能耗和技术参数对碳足迹的影响,人工因素不具有决定性作用。如图 8 所示,在面板加工过程当中,涉及到多种工艺及其辅助物料。在此过程中,数据的收集是关键。从开卷到收卷整个流程,碳排放以物料消耗和能源消耗为主,能源消耗以车间电能消耗为主,物料消耗以 PCM 面板基材钢材和加

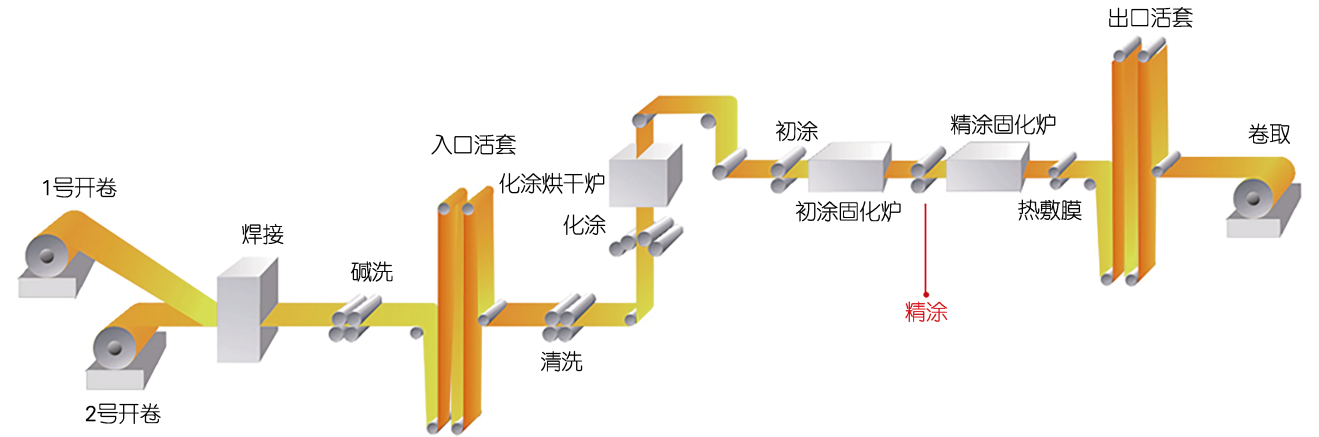


图 7 PCM 家电彩涂板工艺流程图^[19]
Fig.7 Process flow chart of PCM home appliance color coating plates^[19]

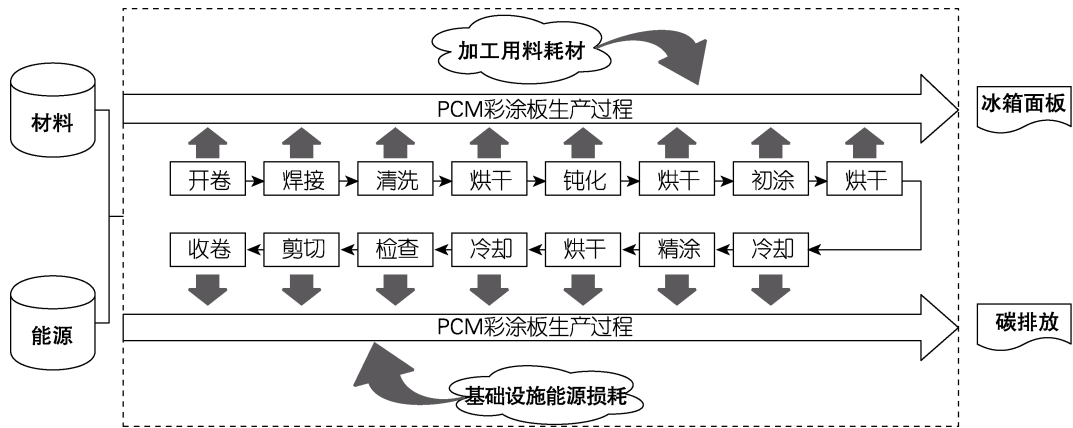


图 8 PCM 面板碳排放细则
Fig.8 PCM panel carbon emission details

工过程中的加工辅助耗材（氨基树脂及催化剂、高分子线性无油聚酯树脂系涂料等）为主，主要材料为面板基材，面板基材质量可知（设为 k_x ），其碳排放系数为 W ，在此基础上，物料消耗碳排放可通过核算模型得出。

表 2 冰箱物料能源消耗表
Tab.2 Energy consumption of refrigerator materials

工序	焊接	清洗	烘干	钝化	初涂	冷却	精涂	剪切
物料消耗	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
能源消耗	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8

在此款冰箱面板的加工工艺流程中，假设相应物料消耗以及能源消耗数据分别为 a 和 b ，工艺流程中加工阶段所消耗的物料及能源参数见表 2。根据相应的碳排放系数可计算出这款冰箱面板 CMF 设计生产过程中的碳排放量 G_c ，具体计算见式（2）。

$$G_c = \sum_{i=1}^8 (a_i \times W_A) + \sum_{i=1}^8 (b_i \times W_B) + k_x W \tag{2}$$

式中： W_A 为生产活动中第 i 类物料消耗的碳排放系数； W_B 为第 i 类能源消耗的碳排放系数。

通过对海尔和其供应商进行详细的数据调研与分析,核算并整理出该款冰箱 PCM 面板的碳排放数据（如表 3 所示）。根据理论计算，此款冰箱面板 CMF 设计单面板碳排放量约为 4.6 kg。随着企业数据的逐步开放，有望通过对工艺流程的进一步分析，修正和优化本文提供的参考计算结果。

表 3 PCM 彩涂板供应商碳排放数量表
Tab.3 Carbon emission of PCM color coating plate suppliers

项目	22 年法人边界消耗/t	22 年法人边界碳排放/t	吨碳排放数/kg	单平方碳排放数量/kg	平均厚度/mm	单吨折算平方/m ²
PCM 面板	83 456.00	38 456.32	460.80	1.63	0.45	283.09

冰箱面板生产加工阶段的温室气体排放的详细数据被冰箱制造商视为商业机密，难以在文中公开展示。因此，该阶段的详细数据难以获取。虽然无法提供具体的材料消耗量和能源消耗量数据，但本文通过建立理论模型，依靠公开的生产过程信息和参数，对冰箱面板碳排放量进行了算定推测。本文旨在展示冰

箱 CMF 的生命周期管理“低碳设计”方法本身，而非其所依赖的具体数据。冰箱制造供应商可根据相关需求轻易获取数值，但这些数据不影响所说明方法的理论构建，仅对“冰箱 CMF 设计产品生命周期管理”方法的实际应用有所关联。从这个层面来说，此方法是可行的、基于理论的工具。

冰箱 CMF 设计碳排核算模型的具体应用是在统计和搜集现有冰箱面板 CMF 设计方案的基础上，建立一个数据库来储存这些设计方案的碳排数据。这个数据库主要用于记录和管理冰箱面板 CMF 设计方案及其对应的碳排数据。在此基础上，在先行设计阶段，选择相应的 CMF 设计方案，提取相应数据并运用核算模型得出碳排数据作为冰箱低碳设计决策因素。

4 冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统构建

在冰箱 CMF 设计碳足迹核算模型的基础上，根据 CMF 设计过程碳足迹核算和产品 CMF 概念设计方法的业务逻辑，构建冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统，为冰箱 CMF 设计的低碳制造和节能减排提供工具支持。在数字化转型浪潮下，通过冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统，冰箱制造企业可以将生产链上的各项数据整合并处理^[20]，实现产品制造过程的数据赋能以及数字化转型。该系统可成为冰箱制造企业

进行低碳制造的有效手段和重要工具，为企业实现数字化低碳制造目标提供数智化平台。本系统的主要功能是通过数据集成和开发，对冰箱 CMF 设计方案进行碳足迹核算，实现冰箱 CMF 设计方案的碳足迹数据服务化、资产化，从产品形成的“早期”认知角度探索低碳产品设计方法，从而将碳排放现状从“被动确定”转变为“主动预防”。该系统的 CMF 低碳设计系统框架见图 9，系统功能如下。

- 1) 该系统应将冰箱 CMF 设计方案所涉及的关键物料和能源数据作集成处理，对冰箱面板用材及面板加工工艺相关数据做数据管理，即构建冰箱 CMF 设计库。这些数据的收集构成了该系统碳足迹核算的基础，因此输入数据的准确性对碳排结果的真实性至关重要，这样构建的冰箱 CMF 设计库才具有参考性。
- 2) 系统能对冰箱 CMF 设计方案进行综合性碳足迹核算，能预先估算冰箱面板 CMF 设计过程中产生的碳足迹数据。根据输入的 CMF 详细设计数据，系统自动计算其碳足迹，从 CMF 设计方案中获取碳排数据，并在系统进行采样分析评估。
- 3) 可以在最终呈现效果相似的情况下选择合理的 CMF 调度方案使产品制造过程中的碳足迹大幅减少。

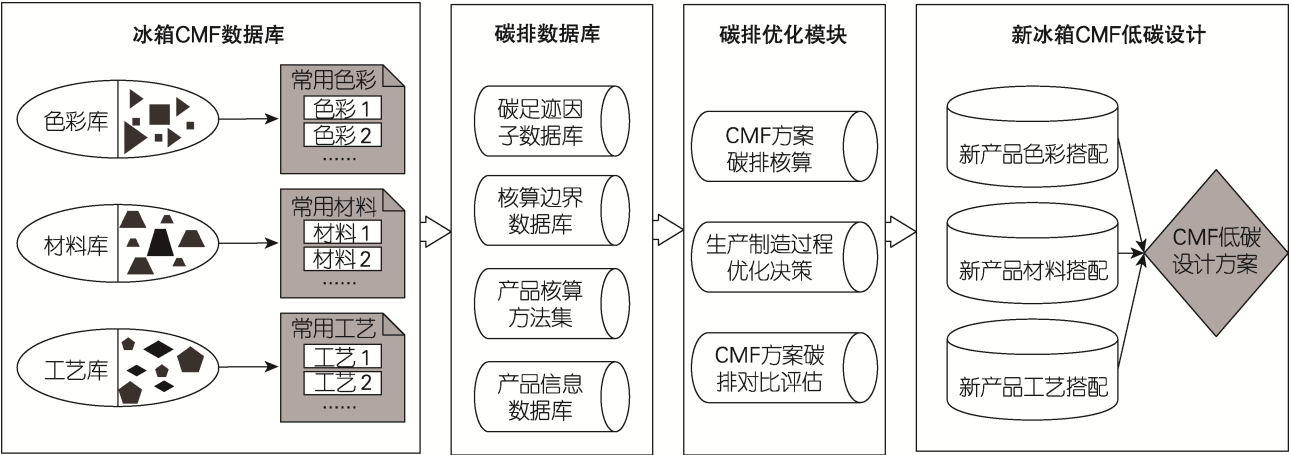


图 9 冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统框架
Fig.9 Carbon footprint accounting system framework of refrigerator CMF low-carbon design

5 冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统原型搭建

基于计算和数据管理两个维度，根据冰箱 CMF 低碳设计流程，设计了一个互联互通的数据中台架构。数据中台架构具有一定的可塑性，可以根据冰箱厂商的消费需求进行组合，单个模块也可以进行扩展。该数据中心平台的目标是使冰箱 CMF 低碳设计数据不断被使用，通过数据中心平台提供的工具、方法和运行机制，将相关数据转化为服务功能，使数据

更好地为冰箱制造企业所使用，实现生产和制造过程的数字化。此外还需要跨价值链测量通过 5G 和 AIoT 等新技术获得的设备和运营的实时数据，以实现基于产品、消费者和服务的全面创新。冰箱 CMF 低碳设计数据中台的架构方案见图 10。该平台是主存储计算平台与上层数据使用之间的完整系统，通过建设冰箱 CMF 低碳设计数据中台，将冰箱制造企业全域海量、多源、异构的相关设计生产数据进行聚合加工，实现数据的资产化管理，并且为冰箱 CMF 低碳设计前台提供数据支撑，帮助企业以数据驱动业务，以达

到精细化运营的目标。

冰箱面板 CMF 设计碳足迹核算系统包括：系统登录功能、数据集、碳排放查询、碳足迹核算、碳足迹优化，以及系统管理模块。目前系统的开发原型见图 11。通过对冰箱 CMF 设计方案进行碳排定量分析，按照碳评价结果，对冰箱 CMF 设计方案进行优选，

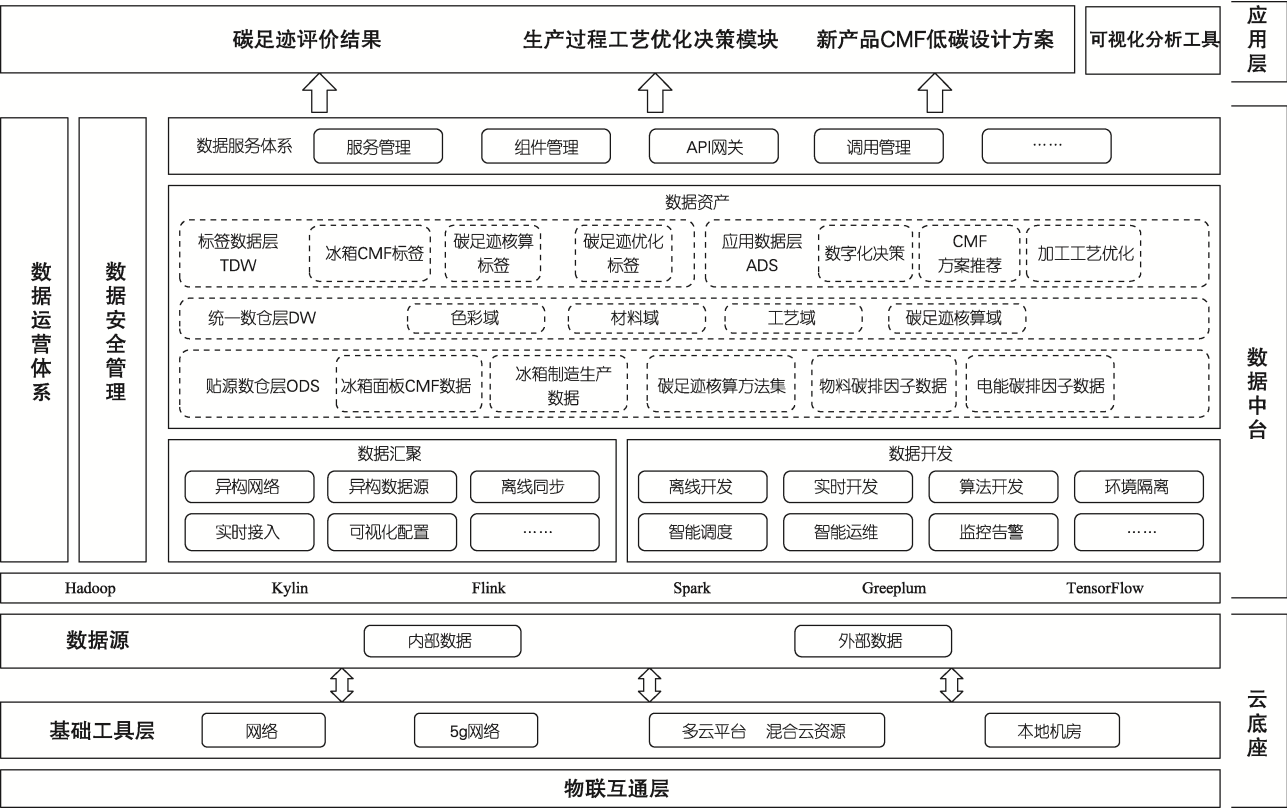


图 10 冰箱 CMF 低碳设计数据中台解决方案

Fig.10 Data middle office solution of refrigerator CMF low-carbon design

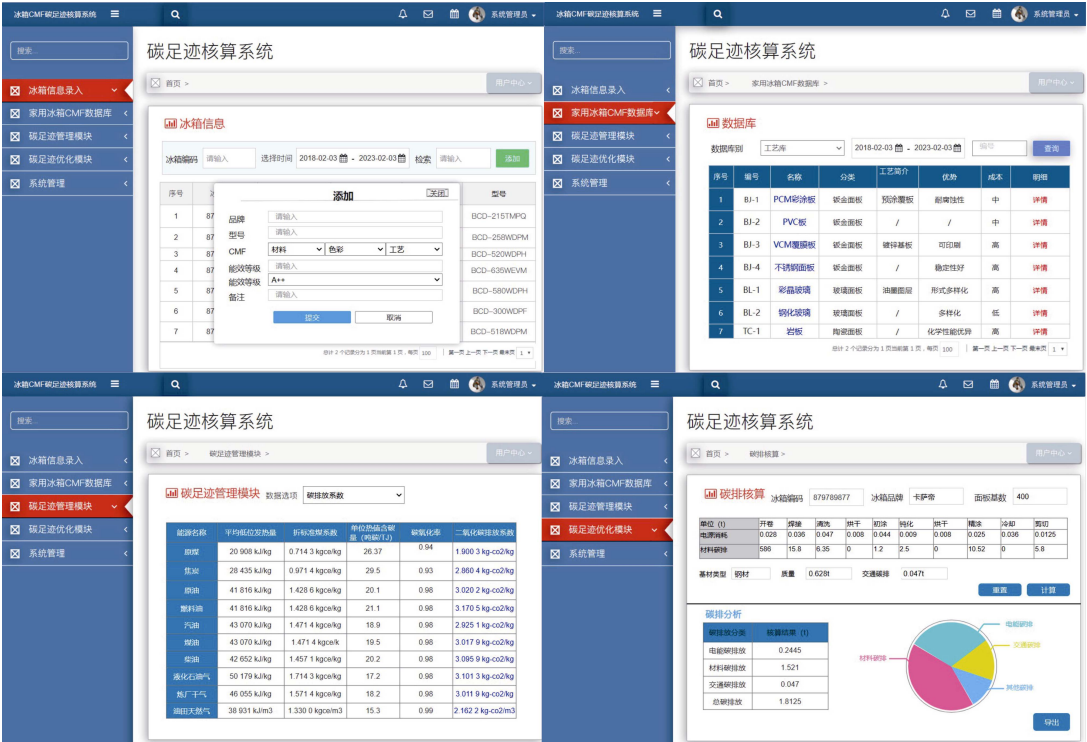


图 11 冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统前端界面

Fig.11 Carbon footprint accounting system front-end interface of refrigerator CMF low-carbon design

并对生产工艺过程进行绿色低碳优化,本研究对冰箱的低碳设计决策具有前瞻性的指导意义。冰箱 CMF 设计碳足迹核算系统实现了加工生产过程碳足迹的核算与监测,并且可以使用核算结果降低碳排放和加工成本,为企业实现冰箱 CMF 设计低碳制造和节能减排提供工具支持。

6 结语

本文构建了冰箱 CMF 设计碳足迹核算模型,对冰箱 CMF 设计提出了碳足迹分析方法,并根据冰箱 CMF 设计碳足迹核算模型构建了冰箱 CMF 低碳设计碳足迹核算系统。通过该系统,在冰箱 CMF 概念设计的初始阶段,可以给出低碳评估的依据。鉴于该方法的应用需要基础数据的支撑,但现阶段基础数据的获取及整合不够充分,因此在冰箱 CMF 设计分析过程中对部分数据引入进行了假设和估测。不同类数据的积累和转化是将本文所提方法应用于冰箱 CMF 低碳设计的关键步骤。本研究仍有一些关键性的问题需要解决,尤其是在表面处理加工工艺过程中的数据收集、各要素之间的相互平衡与影响等方面。虽然良好的架构对冰箱 CMF 低碳设计系统的进一步扩展和运维至关重要,但架构的整体设计只是建设数据中台的起步手段。每个功能模块仍然有很大的挖掘空间。例如,为不同类型的数据选择相应的存储技术、符合数据安全性的审计技术、数据模型设计等。在具体项目中,数据交换与安全保护、新技术运用等之间的平衡也有待进一步完善。

参考文献:

- [1] 周亚敏. 以碳达峰与碳中和目标促我国产业链转型升级[J]. 中国发展观察, 2021, 16(3): 56-58.
ZHOU Ya-min. Promote the Transformation and Upgrading of China's Industrial Chain with the Goal of Carbon Peak and Carbon Neutrality[J]. China Development Watch, 2021, 16(3): 56-58.
- [2] CAI C T. Research and Analysis of Low-carbon Manufacturing Operation Model in Life-cycle Oriented Mechanical Manufacturing Enterprises[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 153(3): 313-319.
- [3] ZHENG Hao, YANG Shang, LOU Shan-he, et al. Knowledge-based Integrated Product Design Framework towards Sustainable Low-carbon Manufacturing[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101258.
- [4] AYDIN R, BADURDEEN F. Sustainable Product Line Design Considering a Multi-lifecycle Approach[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 149(C): 727-737.
- [5] 王力. 绿色设计法在机械设计制造中的应用[J]. 机械管理开发, 2022, 37(7): 334-335.
WANG Li. Application of Green Design Method in Mechanical Design and Manufacturing[J]. Machinery Management Development, 2022, 37(7): 334-335.
- [6] 潘毅. 冰箱内胆高能效低碳制造工艺研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
PAN Yi. Research on High-energy Efficiency and Low-carbon Manufacturing Process of Refrigerator Liner[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [7] 张城, 田晓飞, 阚欢迎, 等. 面向低碳认证的家电产品碳排放核算方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1158-1165.
ZHANG Cheng, TIAN Xiao-fei, KAN Huan-ying, et al. Research on Carbon Emission Accounting Method of Home Appliances for Low-carbon Certification[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition), 2018, 41(9): 1158-1165.
- [8] 裴国阳. 家电产品绿色模块化设计与评价方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
PEI Guo-yang. Research on Green Modular Design and Evaluation Method of Home Appliances[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [9] 张吉春, 孙锦, 孙薇, 等. 基于全生命周期的产品绿色设计平台建设[J]. 绿色科技, 2021, 23(2): 256-261.
ZHANG Ji-chun, SUN Jin, SUN Wei, et al. Construction of Product Green Design Platform Based on Full Life Cycle[J]. Green Science and Technology, 2021, 23(2): 256-261.
- [10] 孙俊军, 鄂玉萍, 田亚利. 基于产品全生命周期的纸包装绿色生态发展模式[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 259-265.
SUN Jun-jun, E Yu-ping, TIAN Ya-li. Green Ecological Development Model of Paper Packaging Based on the Whole Life Cycle of Products[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 259-265.
- [11] 刘英会. 基于电冰箱的绿色产品生命周期评价方法的研究[D]. 山西: 太原科技大学, 2011.
LIU Ying-hui. Research on Life Cycle Assessment Method of Green Products Based on Refrigerator[D]. Shanxi: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.
- [12] 方旭斌. 零件生产过程碳足迹核算模型及其应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
FANG Xu-bin. Carbon Footprint Accounting Model of Parts Production Process and Its Application[D]. Zhejiang Sci-Tech University, 2018.
- [13] ISO 14067, 2018 Greenhouse Gases-carbon Footprint of Products-requirements and Guidelines for Quantification[S].
- [14] 徐锋, 顾新建, 纪杨建, 等. 基于低碳约束的产品概念设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 58-65.
XU Feng, GU Xin-jian, JI Yang-jian, et al. Research on Product Conceptual Design Method Based on Low

- Carbon Constraint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 58-65.
- [15] 孙群, 张为民. 基于碳足迹的生产过程分级递阶控制技术[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9): 1035-1038.
- SUN Qun, ZHANG Wei-min. Research on Hierarchical Control Technology of Production Process Based on Carbon Footprint[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(9): 1035-1038.
- [16] 孙群, 辛绍杰. 典型数控加工工艺过程的碳足迹计算模型[J]. 上海电机学院学报, 2017, 20(6): 329-334.
- SUN Qun, XIN Shao-jie. Carbon Footprint Calculation Model of Typical CNC Machining Process[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2017, 20(6): 329-334.
- [17] 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.
- WANG Ji-kai. Research on Carbon Emission Calculation Method Based on Product Life Cycle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [18] 符永高, 万超, 赵新, 等. 基于生命周期的家电产品碳足迹计算方法研究[J]. 日用电器, 2014, 56(11): 50-54.
- FU Yong-gao, WAN Chao, ZHAO Xin, et al. Research on Carbon Footprint Calculation Method of Home Appliances Based on Life Cycle[J]. Daily Electrical Appliances, 2014, 56(11): 50-54.
- [19] 华美科技. PCM 家电彩涂板工艺介绍图[EB/OL]. (2021-06-09) [2023-04-03]. <http://www.hmchina.com/Product/s6.html>.
- Colorful technology, PCM appliance caitu process is introduced.[EB/OL]. (2021-06-09) [2023-04-03]. <http://www.hmchina.com/Product/s6.html>.
- [20] 李雪瑞, 侯幸刚, 杨梅, 等. 数字孪生驱动的工业产品 CMF 设计服务模型构建与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 307-327.
- LI Xue-rui, HOU Xing-gang, YANG Mei, et al. Construction and Application of CMF Design Service Model for Digital Twin-driven Industrial Products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 307-327.

责任编辑: 蓝英侨

(上接第 71 页)

- [14] FENG Z, GU P, ZHENG M, et al. Environmental Data-Driven Performance-Based Topological Optimisation for Morphology Evolution of Artificial Taihu Stone[C]// The International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication. Singapore: Springer, 2022: 117-128.
- [15] 周媛媛, 刘晓东, 华祖林, 等. 太湖风生流水动力时空差异特征研究[J]. 环境保护科学, 2015, 41(1): 51-56.
- ZHOU Yuan-yuan, LIU Xiao-dong, HUA Zu-lin, et al. Study of the Temporal and Spatial Differences of Hydrodynamic Characteristics of Wind-Induced Current in Taihu Lake[J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(1): 51-56.
- [16] 王为. 斯蒂文·霍尔与“孔洞性”: 一种现象学的空间观念[J]. 建筑师, 2012(2): 5-14.
- WANG Wei. Steven Holl on Porosity: A Phenomenological Idea of Space[J]. The Architect, 2012(2): 5-14.

责任编辑: 陈作