

基于LCA与低碳约束的家具设计方法研究

Research on Furniture Design Methods Based on LCA and Low Carbon Constraints

■王丽¹, 彭叶怡¹, 骆琦^{1,2}, 刘芸¹ Wang Li¹ & Peng Yeyi¹ & Luo Qi^{1,2} & Liu Yun¹

(1.浙江农林大学艺术设计学院, 浙江杭州 311300; 2.浙江省轻工业产品质量检验研究院, 浙江杭州 310018)

摘要: 通过研究与分析, 提出一种生命周期评价(LCA)与低碳约束相结合的家具设计模型, 从预知的角度探讨家具的生命周期碳足迹和低碳家具的设计方法。首先, 基于家具的低碳性能目标, 从功能、结构、材料三个维度构建家具设计的低碳约束条件, 分析了相应约束条件下的不同映射域; 其次, 结合了LCA模型构建的技术过程, 建立了约束分析、约束聚焦、设计解集和设计输出的完整低碳家具设计模型; 最后, 以一款儿童折叠书桌为例, 核验该方法的有效性。结果表明该方法可以有效弥补传统家具设计不能将生命周期考虑在设计前端的缺陷, 为其他领域的低碳设计提供参考。

关键词: LCA; 低碳约束; 家具设计; 碳足迹

DOI: 10.16771/j.cn43-1247/ts.2023.07.004

中图分类号: TS664.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8260(2023)07-0016-06

Abstract: Through research and analysis, this paper proposes a furniture design model that combines life cycle assessment (LCA) with low carbon constraints and discusses the life cycle carbon footprint of furniture and the design method of low carbon furniture from the perspective of prediction. Firstly, based on the low-carbon performance target of furniture, the low-carbon constraints of furniture design are constructed from three dimensions of function, structure, and material, and different mapping domains under the corresponding constraints are analyzed; secondly, combined with the technical process of LCA model construction, a complete low-carbon furniture design model of constraint analysis, constraint focus, design solution set, and design output is established; finally, a folding desk for children is taken as an example to verify the effectiveness of the method. The results demonstrate that this method can effectively make up for the shortcomings of traditional furniture design, which cannot consider the life cycle at the front end of the design and has guiding significance for low-carbon design in other fields.

Key words: Life cycle assessment; Low carbon constraints; Furniture design; Carbon footprint

自然环境的恶化, 使得全球气候变化加剧对人类的生存和发展带来了严峻挑战, 减少温室气体排放已成为世界各国的奋斗目标。我国在2020年9月第75届联合国大会上提出了力争2030年“碳达峰”、2060年“碳中和”的目标, “低碳”热度不降, 深入各行各业。碳足迹、碳标签、碳交易等“碳”周边愈发限制利益相关者的决策。低碳消费、低碳农

业、低碳城市、低碳出行等亦悄然成为人们衣食住行的新方式, 无声影响着人们低碳意识与低碳文化的建构。现阶段我国的低碳计量标准及相关概念的体系虽然正从“主观—片面—定性—随意”向“客观—系统—量化—标准”转变, 但仍尚未完善, 大多数碳排放量的计算模式基于“已经完成”或“正在进行”的活动来评价结果, 较少

从“将来发生”的预判活动角度来合理减碳的认识^[1]。因此, 本文以低碳家具设计为出发点, 从设计活动前端考虑减少家具的碳排放量结果为落脚点, 构建并总结了以功能、结构、材料三个维度的家具低碳约束条件及其映射域, 在产品形成的前端结合LCA法研究低碳家具的设计流程, 以前瞻性思维指导低碳家具设计。

基金项目: 浙江省“尖兵”研发攻关计划项目(2022C03039)

作者简介: 王丽(1977-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 绿色低碳产品设计与理论, E-mail: 20030047@zafu.edu.cn

通信作者: 骆琦(1977-), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向: 家居制造与检测, E-mail: 16438788@qq.com

引文格式: 王丽, 彭叶怡, 骆琦, 等. 基于LCA与低碳约束的家具设计方法研究[J]. 家具与室内装饰, 2023, 30(07): 16-21.

WANG Li, PENG Yeyi, LUO Qi, et al. Research on Furniture Design Methods Based on LCA and Low Carbon Constraints[J]. Furniture & Interior Design, 2023, 30(07): 16-21.

表1 低碳约束条件与映射域分析

低碳约束条件		映射域
功能低碳约束	实用功能 审美功能 辅助功能	放置、收纳、承重等 造型、色彩、图案等 音响、消毒、烘干等
结构低碳约束	家具结构 包装结构	可拆卸、减量化、模块化结构标准化零件等 缓冲、承重、开合结构等
材料低碳约束	家具材料 包装材料 回收废料	采用板式、板木材料,减少实木材料,选用 再生塑料与环保金属等 循环利用 可回收材料

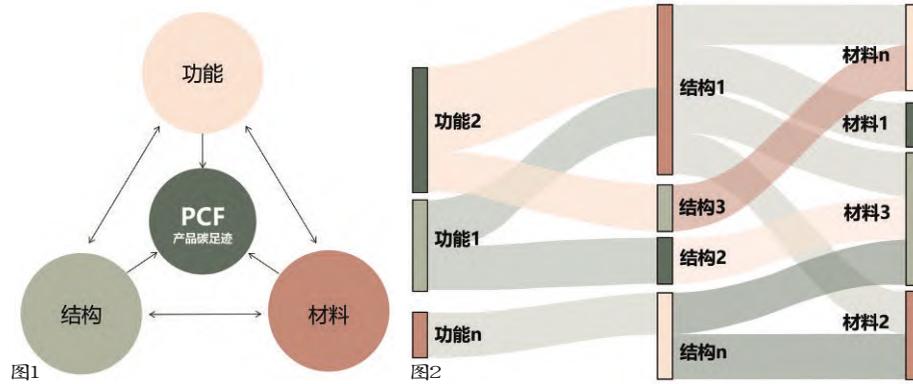


图1

图2

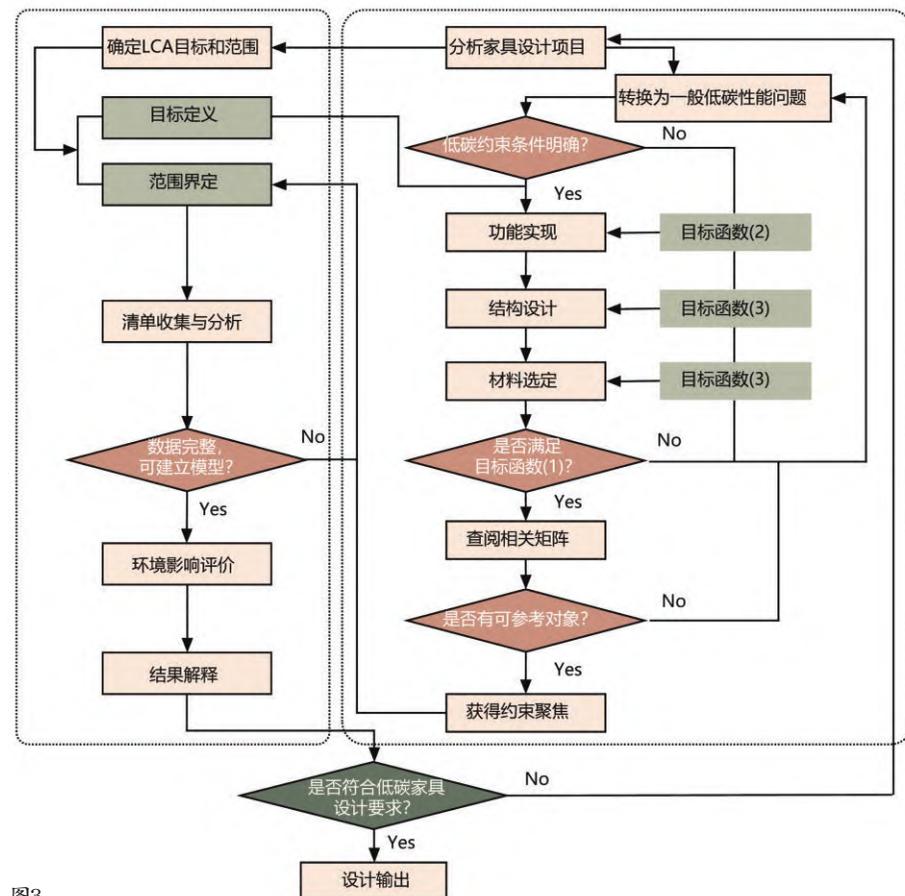


图3

图1 产品碳足迹与低碳约束条件关系图

图3 LCA与低碳约束结合的家具设计模型

图2 家具设计低碳约束条件关系图

1 LCA与低碳约束的基本理论

1.1 LCA理论

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是对产品从“出生”、成长、成熟和衰退的整个生命周期的输入、输出和潜在环境影响的综合分析方法^[2],它是用于分析、对比和支持各种方案、决策的普适方法。衡量产品或服务在生命周期中排放的二氧化碳和其他温室气体的总量称为产品碳足迹(Product Carbon Footprint, PCF),它对LCA评价起到关键作用^[3]。运用LCA理论的目的就是要助力减少产品碳足迹,降低碳排放量,做到在产品生命周期的各个阶段中合理利用资源,最大化实现产品功能。

现阶段LCA在家具设计时,主要呈现两种情况:①评价主体为市场已有产品,发现并改进碳排放较严重的制作工艺或产品特性。其中,黄圣游等^[4]通过对比和分析了2款木制床头柜的产品碳足迹,指出从采购、设计、工艺、管理等方面制定减排措施。杨晓梦^[5]以EDIP模型方法为基础对竹制家具的生命周期评价进行建模,对竹集成材扶手椅和竹重组材圈椅进行LCA评价,结果表明两种家具的原材料制造均是影响环境的主要阶段。孙昆^[6]以LCA方法为基础,计算竹集成材茶几生产阶段的碳足迹,研究发现该产品的原材料竹条的加工过程碳足迹最高,其次是竹集成材加工过程。②评价主体是方案设计产品,检验它是否具备低碳属性。如江映其等^[7]运用LCA分析了三种木质类家具,得出了主要环境影响因素,证明了环境影响值最小为板式家具,最大为实木家具,板木家具适中。刘宗明等结合次元理论解构竹家具的全生命周期,重构了竹家具各个生命阶段的减量化设计原型,以衣帽架验证了产品的低碳特性。张艺鸿等^[8]运用LCA理论提出再生塑料家具的设计原则,以再生塑料家具的生态设计特征进行解析。

1.2 低碳约束

约束理论(Theory of Constraints, TOC)是管理中一套改进和解决系统关键的逻辑化思维流程(Thinking

Process, TP), 后被应用于设计领域^[9]。TOC理论是以研究系统存在的各类约束为中心点, 综合运用逻辑化的TP思维流程来识别系统存在的约束, 即约束条件, 继而找到消除当前约束条件的突破点, 即映射域, 以保证解决方案有效克服约束。换言之, 就是在参与设计时把约束条件引申为限制条件, 在限制条件下从映射域中找到解决问题的关键, 并有序处理和优化系统的瓶颈。当前, 约束理论在家具设计的应用研究不多, 家具设计要以实现产品的低碳性能为目标, 故把家具设计看成一个系统, 找出影响家具碳足迹的因素作为约束条件, 解锁低碳家具设计的映射域。因此, 将低碳约束融入家具设计有一定研究价值。

2 家具设计的低碳约束条件及映射域

2.1 低碳约束条件

经过相关文献^[10]及家具设计领域知识的分析与整理, 影响家具碳足迹的因子有设计要素和设计活动。家具的设计要素主要包括功能、结构、材料和外形。家具的外形对产品的空间体量具有建构作用, 通常以功能为先导, 以材料来实现, 并依附于其结构^[11]。同时, 外形作为功能的外在表现, 其所传达的信息符号发挥着审美功能, 因此本文将家具的外形设计要素考虑在功能要素内, 即体现家具功能的实用性与审美性的双重特征^[12]。除了设计要素以外, 有研究表明, 产品生命周期过程中的碳排放量是由前期的设计活动决定, 在前期设计活动过程中所考虑的功能、结构及材料等对产品加工、仓储、销售、使用及回收过程的碳排放数据有着重要影响^[13-14]。基于此, 提出从功能、结构、材料三个维度来划分家具设计的低碳约束条件, 即功能低碳约束、结构低碳约束和材料低碳约束^[15]。其中功能低碳约束包括实用功能、审美功能、辅助功能; 结构低碳约束包括家具结构、包装结构; 材料低碳约束包括家具材料、包装材料、回收废料。

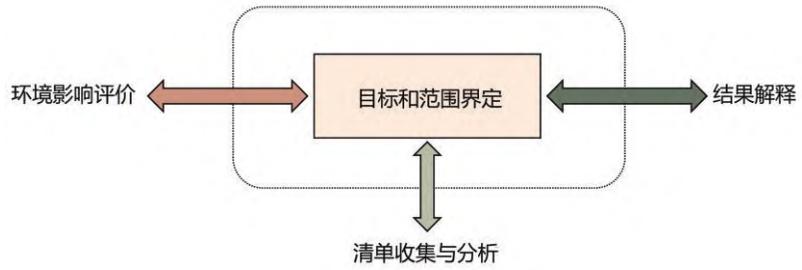


图4

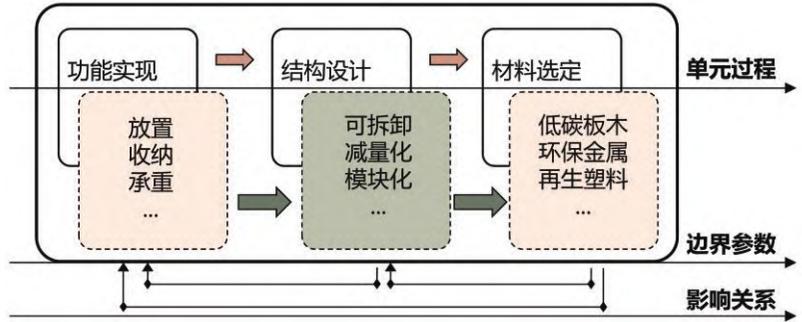


图5

相关矩阵

结构设计 功能实现	结构1	结构2	结构3	结构N	同类产品对比
功能a	f ₁₁	f ₁₂	f ₁₃	f _{1b}	同类型产品对实现同一功能所选用的不同结构和材料的碳足迹比较
...	f _{a1}	f _{a2}	f _{a3}	f _{ab}	
作用a	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E _{1b}	
...	E _{a1}	E _{a2}	E _{a3}	E _{ab}	

图6



图7

图4 生命周期评价

图6 功能结构展开相关矩阵

图5 家具设计的边界参数及关系示意图

图7 儿童折叠书桌低碳设计模型

表2 儿童折叠书桌产品部件

产品部件	材料	数量
桌面板	橡木	1
面板A	纤维板	1
面板B	纤维板	1
面板C	纤维板	1
面板D	纤维板	2
面板E	纤维板	1
面板F	纤维板	1
冲孔单板	铝	1
U型腿架	仿木金属	1
翻板铰链	五金	4
翻门铰链	五金	2
三合一链接件	五金	8
穿孔链接件	五金	4
1.5寸合页	五金	2
抽屉滑道	五金	1
抽屉(含各面板)	橡木	1
配椅(含各面板)	纤维板	1
万向滑轮	硅胶	4
挂钩	仿木金属	2



图8

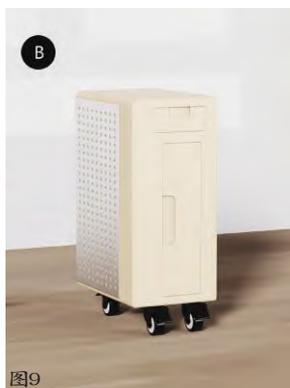


图9



图10



图11



图12



图13

■图8 儿童折叠书桌产品a
■图9 儿童折叠书桌产品b
■图10 儿童折叠书桌产品c

■图11 儿童折叠书桌产品d
■图12 儿童折叠书桌产品e
■图13 儿童折叠书桌产品f

在家具设计的实际应用中,功能、结构、材料三者低碳约束条件之间往往具有关联。结构设计作为主体,是实现功能的基础,同时也需要参照材料及其工艺。在实现家具的相同功能可以选用不同结构,相同结构可以选用不同材料,相同材料反过来构成不同的结构影响功能,最终影响家具的碳足迹及其成本。三者低碳约束条件的关系如下(图1-图2)。

2.2 映射域

家具设计的低碳约束条件确定后,要通过多种研究方法解析每一约束条件的映射域,而映射域将成为家具设计过程中拟解决的关键因素。

在具体设计过程中,功能作为中心环节。经调研,目前市场上家具的功能逐步丰富与多元化,多功能家具正应可持续、绿色、循环倡导大步流星地发展。从多功能家具考量,其功能低碳约束一般映射为考虑产品放置、收纳、承重等主要实用功能问题,包括产品造型、色彩、图案等外观审美功能问题,以及除产品主要功能外的具有音响、消毒、烘干等其他辅助功能问题。实现家具的多个功能相互转化可围绕“一物多变”动态化与“一物多能”静态化两种类型为设计着眼点。

结构作为主体。结构低碳约束一般映射为设计时考虑可拆卸结构、减量化结构、模块化结构、标准化零件等家具结构问题,以及合理包装缓冲结构、承重结构、开合结构等问题。不同结构所选用的不同材料密度、尺寸、质量等都会影响家具的碳排放系数,针对特定功能的产品合理设计结构达到低碳家具的要求,如规避选择全可拆、局部可拆的榫卯结构家具设计、空心结构板件的减量化家具设计。

材料作为实现结构和功能的基础。材料低碳约束一般映射为考虑家具材料问题、包装材料问题与回收废料问题。进行家具选材时,如采用板式、板木材料,减少实木材料,或再生塑料与环保金属等多种材料的交叉综合。

进行包装选材时,尽可能减少产品在仓储、运输时的损耗,即可减少因退换产品而产生的交通工具碳排放量。综上,功能、结构和材料三者低碳约束条件的映射域分析如下所示(表1)。在具体操作时,可依项目要求灵活应用,低碳约束的映射域各有侧重。

3 LCA与低碳约束的家具设计模型

在家具产品形成的前端,正确的设计方向对家具的低碳性能具有决定性影响。以“设计预知”视角结合LCA与低碳约束重构家具设计流程,成为低碳家具输出的重要环节。结合上述分析家具设计的功能、结构、材料三个维度的低碳约束条件及其对应映射域,拟定LCA与低碳约束两者结合的家具设计模型(图3)。

3.1 具体流程

步骤1:确定LCA评价目标。根据国标ISO14040—2006《环境管理-生命周期评价-原则和框架》中将LCA的实施分为四个阶段:目标和范围界定、清单收集与分析、环境影响评价和结果解释^[16](图4)。LCA贯穿于低碳约束的全过程,在执行设计任务时,首先分析具体项目,确定产品的低碳性能目标,结合家具设计的低碳约束条件确定LCA的目标:所设计的家具是否符合低碳设计要求。

步骤2:约束分析。将家具设计问题转换为一般低碳性能问题,并将实现产品环保属性的低碳约束条件与LCA目标相结合。本文的边界参数主要由功能实现、结构设计、材料选定这三项关联数据提供(图5)。家具结构和材料选择对产品功能实现有重要影响,同时功能使用、结构与材料选取直接影响家具产品的碳足迹。因此,拟定下列公式为目标函数。

$$C=f(F, S, M) \quad (1)$$

其中, F 表示功能, S 表示结构, M 表示材料。家具产品发挥作用过程中产生的碳排放量与结构选择相关,选用低碳结构能有效减少功能的碳足迹。功能碳足迹数学公式为。

$$\beta=Z(p, d) \quad (2)$$

其中, β ——功能碳足迹, p 表示实现功能的低碳结构, $p \in \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$; d 表示低碳结构满足功能的评价因子, $d \in \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ 。家具产品结构必须由材料实现以达成功能,结构与材料的关系采用下列公式,即产品的结构碳足迹数学公式为。

$$\alpha=F(i, j, k) \quad (3)$$

其中, α ——结构碳足迹, i 表示结构的尺寸, $i \in \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$; j 表示结构材料密度, $j \in \{J_1, J_2, \dots, J_m\}$; k 表示材料碳排放因子, $k \in \{K_1, K_2, \dots, K_t\}$,碳排放因子可查阅IPCC等相关数据库。

步骤3:约束聚焦。此阶段对家具设计项目进行初步约束聚焦,采用QFD原理转变而来的功能结构展开相关矩阵(图6),查阅同类型产品对实现同一功能所选用的不同结构和材料的碳足迹,比较后为低碳家具设计输出提供可参考的对象。图中 N 代表结构形式; f_{ab} 代表每一种结构为了实现功能 a 的碳足迹; E_{ab} 代表每一种结构发挥作用 a 的表现等级0至10,0代表无作用,10代表作用最优。

步骤4:设计解集。根据约束条件转化的目标函数与功能结构展开相关矩阵,筛选可参考的对象。分别从功能、结构、材料低碳约束对应的映射域进行设计策略评估,得到低碳家具设计的较优方案。

步骤5:结合设计解集,确定LCA范围。由于前面的阶段处于家具的设计阶段,无法收集完整的使用寿命数据,其评价的范围只能从已有的产品数据清单和数据库等信息确定。家具的使用寿命评价范围还应当考虑能量流、物质流和碳储存,具体包括原材料、成品及附加物等的运输过程中所消耗的柴油或汽油这类石化能源,加工过程中所消耗的电力能源,产品包装信息所添加的胶黏剂及油漆等附加物物质流(包装胶带等使用量较少的附加物碳排放忽略不计),以及转移存储在家具产品中的生物碳储量。

步骤6:清单收集与分析。根据已确定的LCA目标和范围,查阅已有产品数据清单、生命周期评价数据库等,找出与产品相关或者类似的原材料、零部件、结构信息,以及相似的包装装配、仓储运输、使用回收等数据进行筛选。若无法找到的数据,采用代替法或权重法进行数据补偿^[17],建立完整的使用寿命评价模型。

步骤7:环境影响评价与分析。对家具产品的生命周期模型进行评价,推断其是否符合低碳设计要求,若符合则完成设计输出,否则重新分析家具设计项目,提出新的设计方案。

步骤8:设计输出。将符合低碳设计要求的家具制版打样,完成样品检验与修改后,投入生产,输出成品。

3.2 数据收集

在家具设计的整个流程中,产品相关的信息数据收集十分重要,包括已有数据和人工数据。生命周期评价数据库如Simapro中提供了各个方面的已有数据,相关文献也可收集碳排放因子。其他数据的收集,如零件加工过程中的耗能,需要人工计算。对于一些无法找到和难以精准核算的数据,可进行数据补偿,方法有逻辑代替、平均值代替、回归分析代替等^[18-19]。

4 案例应用

以一款儿童折叠书桌为例,对上述的设计模型可行性加以验证。常见儿童书桌主要由面板、桌腿、抽屉、配椅等四个设备部件组成。每个设备部件又由结构和材料共同作用实现功能,同一功能可以选择不同结构,如满足可调节的桌腿可以是伸缩结构,也可以是嵌入式结构等^[20]。

假设产品要符合低碳家具设计要求,以6至12岁小学生群体为目标用户。儿童折叠书桌强调用户从学校回到家中或补习班继续进行轻量化学习的关联性,主要配备支撑、收纳作用^[21-22]。

产品低碳设计模型(图7)由底至上的各个层次之间的关系来实现,材

料的碳排放因子由数据库补充,结构和碳足迹通过材料密度及尺寸建立关系,功能和碳足迹通过前述的相关矩阵来建立关系,由 α 得出结构的碳足迹矩阵 f_{ab} ,并给出每种结构发挥作用的价值等级矩阵 E_{ab} ,参照同类型产品的相关碳足迹,找出家具的低碳设计因子。给出儿童折叠书桌产品(图8-图13),其组成的各个材料面板及结构零部件如下所示(表2)。

收集原材料、附加物及成品从A地到B地的运输距离及消耗的汽油数据,产品材料面板等加工过程中消耗的电力能源,橡木防腐采用水性环保漆、包装用纸箱及其他胶黏剂等附加物的碳排放因子,建立数据清单。由于橡木在生产加工成面板时,将其碳汇转移存储到产品中,因此儿童折叠书桌碳足迹测算应当计算所有二氧化碳排放当量减去产品中转移的碳储量^[23]。经评价此产品对环境影响效率低,符合低碳设计要求,输出设计^[24]。

5 结语

本文基于LCA与低碳约束理论,从设计“活动前端”首次提出两者结合的低碳家具设计模型,运用于儿童折叠书桌设计实践中,并对设计模型进行验证。该模型从功能、结构、材料三种低碳约束条件提供了家具设计的映射域,帮助设计人员在设计前端把产品减碳考虑在内,结合功能结构展开矩阵,科学地指导低碳家具设计因子的选择,以生命周期评价有效地输出符合低碳要求的家具。由于篇幅有限,文章在数据收集、数据库来源以及碳足迹与成本的平衡方面尚未作出关键性讨论,后续研究将进一步补充,为其他领域的低碳设计贡献方法。

(责任编辑:张 杨)

参考文献:

[1]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(07):58-65.

[2]刘宗明,余国伟.基于全生命周期理念的竹家具减量化设计研究[J].家具与室内装饰,2021(03):1-6.

[3]周鹏飞,顾蕾,彭维亮等.竹展开砧板碳足迹计测及构成分析[J].浙江农林大学学报,2014,31(06):860-867.

[4]黄圣游,林立平,李俊长.木质家具的碳减排措施[J].家具与室内装饰,2016(10):84-85.

[5]杨晓梦.基于LCA理论的竹制家具产品的评价与设计研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2014.

[6]孙昆.基于低碳理念的竹材料家具设计研究[D].北京:北京服装学院,2016.

[7]江映其,雷亚芳,孟祥彬.基于生命周期评价的3种木质类家具环境影响比较研究[J].西北林学院学报,2014,29(04):232-236.

[8]张艺鸿,黄彬.基于LCA理论的再生塑料家具设计研究[J].家具与室内装饰,2020(01):28-29.

[9]胡斌梁,许功元.基于约束理论的产品造型概念设计研究[J].机械设计,2017,34(02):119-121.

[10]邓亚娟.基于绿色设计理念的室内家具设计思考[J].包装工程,2020,41(12):325-329+340.

[11]朱云.基于可持续理念的儿童多功能家具设计[J].家具与室内装饰,2021(08):63-67.

[12]赵晓曦.基于低碳环保理念的可回收木质家具设计研究[J].林产工业,2020,57(08):80-82+85.

[13]康欢,曹国忠,赵超凡.基于产品生命周期的多功能家具设计[J].包装工程,2018,39(14):39-43.

[14]李叶,张帆.可持续理念下的老幼共享型空间家具设计研究[J].家具与室内装饰,2021(01):8-11.

[15]刘志霞,王蕊.基于可持续发展视角下的纸家具3R设计研究[J].包装工程,2019,40(06):217-222.

[16]詹秀丽,戴向东,吴义强等.“双碳”战略背景下的家具减量化设计技术研究[J].家具与室内装饰,2022,29(09):1-5.

[17]李振升,邱国鹏.可持续理论下小户型空间桌椅类家具设计策略[J].家具与室内装饰,2022,29(02):120-123.

[18]施爱芹,徐畅.融合共生:包装与家具功能互换的木制产品设计研究[J].家具与室内装饰,2021(12):82-85.

[19]陈媛媛.绿色理念下的家具设计策略[J].包装工程,2022,43(02):286-289.

[20]肖德荣,杨思琦,谭富红.“双碳”视域下城市租住空间扁平化竹家具设计研究[J].世界竹藤通讯,2023,21(02):77-82.

[21]李宏.乡村振兴下秸秆家具绿色模块化设计研究[J].包装工程,2022,43(14):272-278.

[22]杨越淳,张蕾,王海东等.C2C理念下的木家具回收利用及回收流程体系研究[J].林产工业,2022,59(03):61-65+68.

[23]胡茜雯,林秋丽,方海.面向设计阶段的家具生命周期评价研究进展[J].林产工业,2021,58(11):80-83+86.

[24]赵志强,韩雪飞,陈世杰等.基于LCA和TRIZ的产品生态设计方法研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2013,36(01):11-14.