

【专题：数据驱动的设计】

数据驱动的可持续设计

刘宣慧¹, 郝宇凡¹, 尤伟涛¹, 江浩¹, 孙凌云^{1,2}

(1.浙江大学 南方电网人工智能创新联合研究中心, 杭州 310058;
2.浙江大学 计算机辅助设计与图形学国家重点实验室, 杭州 310058)

摘要: **目的** 从产品的全生命周期角度解释大数据对可持续设计的驱动作用。**方法** 通过文献综述法, 首先介绍数据驱动的设计和可持续设计, 并阐述产品全生命周期中各个阶段的特点及其对资源的使用情况。基于数据驱动应用生命周期思维对产品进行可持续设计, 解释大数据在产品全生命周期各个阶段的作用, 以及产品的全生命周期如何在大数据的帮助下, 实现资源的高效利用和更加低碳的产品生产流程, 影响产品的生产模式以及人们的生活方式。**结论** 在数据驱动的可持续再制造机制基础上, 提出了在产品规划到产品原型制作的过程中运用大数据对产品设计的各个阶段提供指导的框架。该框架可用于指导设计师将可持续和低碳设计的思想贯穿在设计过程中, 进而促进资源在生产与回收过程中的高效利用, 优化产品生产模式。

关键词: 数据驱动的设计; 可持续设计; 产品生命周期; 产品设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)18-0001-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.18.001

Data-Driven Sustainable Design

LIU Xuan-hui¹, XI Yu-fan¹, YOU Wei-tao¹, JIANG Hao¹, SUN Ling-yun^{1,2}

(1.Zhejiang University China Southern Power Grid Joint Research Centre on AI, Hangzhou 310058, China;
2.State Key Laboratory of CAD&CG at Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

ABSTRACT: This paper aims to explain the driving effect of big data on sustainable design from the perspective of the whole product life cycle. By applying the method of literature review, this paper introduces the data-driven design and sustainable product design, and explains the characteristics of various stages of the whole product life cycle as well as resource usage in each stage. Based on the data-driven method and product life cycle theory of sustainable design, we explain the role of big data in various stages of the whole product life cycle, and how big data support the product life cycle to achieve more efficient use of resources and a low carbon product production process, influencing the production model and people's lifestyle. Based on the data-driven mechanism of sustainable remanufacturing, a model of how big data can be applied to provide guidance for each stage of product design (i.e., from product design planning to product prototyping) is proposed. The model can be used to guide designers to integrate the idea of sustainable and low-carbon design into the whole design process, in order to promote the efficient utilization of resources in the process of production and recycling and improve the production model.

KEY WORDS: data-driven design; sustainable design; product life cycle; product design

中国政府在第七十五届联合国大会上提出, 争取在 2060 年前实现碳中和。环境的可持续性成为了经

济发展的动力^[1], 可持续设计得到了广泛关注。碳中和正在改变人们的日常生活, 比如奶茶店的可降解吸

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目(2018AAA0100703); 国家自然科学基金(62107035); 浙江省科技计划项目(2019C03137)

作者简介: 刘宣慧(1989—), 女, 山东人, 博士, 浙江大学南方电网人工智能创新联合研究中心助理研究员, 主要研究方向为可持续设计。

管、新能源汽车、企业的低碳转型等^[2]。在产品设计中,低碳的设计理念需要贯穿于产品完整的设计过程中^[3]。基于大数据的迅速发展,设计师除了根据最佳实践和个人经验进行产品设计,还应将丰富的数据资源和设计过程相结合,充分考虑产品全生命周期的资源利用与回收情况,优化产品生产模式,改善用户生活方式,使设计过程建立在对数据充分分析的基础上,实现数据驱动的可持续设计。

1 研究背景

1.1 数据驱动的设计

数据驱动的设计是一种以用户为导向的设计方法,即由数据支持帮助设计师了解目标受众的设计方法^[4]。它通过了解现有的条件以帮助推动设计的发展和创造,能够使数据反映的信息支持设计师的直觉或是引导他们找到更好的解决方法,它可以被定义为设计过程中的一种依赖用户行为与态度数据的决策方法^[5]。这种方法能够了解设计师的设计目的是否在用户交互过程中得以实现,以此来指导设计决策,并达到设计契合用户需求的目的,帮助设计人员创建最佳用户体验^[6]。

数据驱动的设计方法也能够很好地支持设计问题的相关研究。Fiore^[7]通过收集实际的家电购买数据,以及调查用户需求,发现家用电器实际购买量在物联网场景下并未达到预期,他在此数据调查基础上提出可以通过关注产品的可持续性来缓解这种技术压力,在实现产品创新的同时提高用户体验,实现具有环保意识的产品设计。Nachtigall^[8]通过使用数据驱动算法、参数和生成系统来进行鞋子的设计,他描述并部署了一款协助设计师打造个性化产品服务的鞋类设计游戏,以帮助设计师适应数据与数据制造系统,对传统设计制作方式提出了新挑战。

数据驱动设计的一般方法包括两种:第一种是采集大量的定量数据(通常是“大数据”)为设计过程提供参考信息,这种方法广泛应用于各个领域;第二种是采集定性数据为过程提供信息,这种方法是设计过程的源动力^[9]。定量数据反映用户的实际情况,侧重于分析用户在数据中反映的事实结果,方法包括A/B测试、眼动追踪、大样本调查等;定性数据了解用户动机,提供有关用户动机和意图的见解,侧重于分析用户作出选择的原因,方法包括采访、竞争对手分析、用户流程图等。

设计过程通常被视为一门艺术,传统的设计决策过程更依赖于设计师的直觉和实践经验,然而只相信直觉而不是利用数据获得现实生活的反馈是一种危险的方法,它可能会使设计师无法读懂用户想法,导致设计与用户需求不一致,并很可能使设计师在更改无效的设计选择上浪费精力和时间^[10]。而数据驱动的设计方法带来最主要的变化在于结合大数据的辅助

来帮助设计师获得最佳实践结果^[11]。它能够根据用户行为、态度和需求等数据帮助设计师创建以用户为中心的设计和更好的用户体验。设计师可以用定量数据来验证他们的本能选择,并从定性数据中更好地了解用户的需求与动机,并相应地调整设计。数据驱动的设计要求设计师在设计过程中在直觉和数据之间保持平衡,不使数据限制自己的创造力,而是将其作为辅助工具,激发灵感并作出更好的设计选择。除此之外,数据作为一种设计辅助工具,让设计师在设计过程中能够获得更多的有效信息,同时数据驱动的设计技术可以节省时间和资源,它通过呈现与分析用户研究数据,能够减少获得最终设计结果所需的迭代次数,使设计师在设计过程中减少更改与试错的工作,将更多的时间用于创造性工作,能够有效提高设计师的生产力^[12]。

1.2 产品可持续设计

“可持续设计”一词是指创造新事物以解决可持续性相关问题的理性和结构化过程^[13]。可持续设计是在可持续发展的基础上被提出的,1987年的Brundtland报告^[14]提出了最常被引用的可持续发展的定义,即既满足当代人的需求又不损害后代人满足其需求能力的发展。随着可持续发展概念得到广泛认可,设计师们开始寻找新的设计理念及模式与可持续发展相适应,于是产生了可持续设计的概念,它是设计界对人类发展与社会问题之间关系的深刻思考以及不断寻求变革的实践历程。自20世纪中叶以来,像Fuller^[15]和Papanek^[16]这样的先驱开始参与可持续发展议题的讨论,可持续设计理论的发展,它可以被定义为一种以推进可持续发展理念为目的,通过某种方式开展的设计实践、教育和研究活动。可持续设计的理论用于优化利用资源的同时,还可以指导人类的发展确保其公平分配。随着物质的丰富,可持续设计原则为重新思考工业产品、流程和业务等起到了指导作用,它的研究过程是与时俱进的。

1.3 产品全生命周期

针对可持续设计对环境、人口和经济等因素综合考虑的要求,工业产品的全生命周期是多维的。在产品规划阶段就已经需要考虑产品的再制造回收过程^[17]。

产品生命周期是指一种新产品从开始进入市场到被市场淘汰的整个过程,可分为四个阶段:引入期、成长期、成熟期以及衰退期^[18]。在引入期,新产品投入市场,用户对产品不了解,用户量增长缓慢,产品还在探索中,市场前景不明朗。在成长期,市场接受产品,用户对产品已经熟悉,用户量增长迅速,市场方向明朗,竞争者纷纷进入,企业必须提高其质量。在成熟期,销售和利润达到顶峰,用户增长缓慢,潜在用户减少,市场需求趋向饱和。在衰退期,新产品

的替代品出现,用户转向其他产品,使原有产品的用户量迅速下降。

随着绿色可持续发展理念逐渐融入产品制造,产品全生命周期各个阶段的资源使用、废弃和回收情况需要被多维度呈现,产品的生命周期以此为标准可以被划分为原材料生产、产品制造、产品使用、产品再制造和产品处理阶段,产品在使用结束时,报废产品可以通过回收某些成分来制造相同产品或其他产品,即产品再制造,这是可持续设计思想的重要体现。未进入再制造阶段的产品则会被当作垃圾填埋或焚烧处理,即产品处理。产品全生命周期见图 1,产品生命周期划分有便于定义与研究产品的再制造过程,在产品设计的过程中融入可持续思想^[19]。

产品生命周期的不同阶段对材料效率、节能和污染控制具有重要意义,在传统的产品生命周期管理中,产品再制造往往是被忽视的一环。根据相关研究,再制造被认为是回收资源,实现可持续生产的有效方法。与新产品制造相比,再制造可以实现节能 60%,节材 70%,将成本节约 50%以上,能够有效减少环境污染^[20]。产品专注于全生命周期再制造过程,而不仅仅是有限的生命周期。同时产品再制造使得报废产品能够得到妥善处理,这能够有效减少产品报废量,并对回收使用过的产品或设备进行可持续设计,实现了全过程清洁可持续生产,大大节省了产品的制造成本和能耗,建立了具有可持续产品设计、绿色制造、全生命周期再制造与回收的可持续清洁生产生态圈^[21]。再制造有效跟踪与回收废旧产品,并结合用户喜好针对回收产品实施针对性的再造与定制化升级,这样的模式能有效解决再制造产品市场接受度低的问题,有助于实现高质量低成本的服务市场生态圈,提升用户体验,使产品能够始终满足不同客户的需求。

2 相关研究进展

在全球范围内,可持续性和数字化已经成为了未来社会发展的重要趋势,快速复杂的数字化趋势以及实现可持续发展目标的挑战推动了各项相关议程的提出^[22]。联合国在 2015 年通过了 2030 年可持续发展议程 (SDG),希望通过整合经济、社会和环境三大支柱实现可持续发展目标^[23]。在 SDG 议程中,自然、

社会和企业紧密交织在一起,成为一个高度关联的系统网络。面对这样复杂和巨大的挑战,要实现本议程需要对全球经济和社会体系进行颠覆性转型,制造业、服务业和能源产业都需要将可持续发展议程融入生产中。鉴于数字化在处理复杂社会问题方面的非凡能力^[24],它被认为是解决可持续发展目标最有希望的转型方法之一。Fukuda-Parr 和 McNeill 强调了数据驱动在塑造可持续发展^[25],特别是实现可持续发展目标方面的作用,可见数字驱动已经成为了可持续设计中的一种重要的应用方法,因此在本研究中,可以以可持续性作为背景,查阅使用数据驱动方法实现目标的相关文献,描述其研究内容及研究方法。

根据 Vikas 的研究,任何组织对于可持续性的研究都应参考 Elkington 提出的通过判断社会、经济和环境维度是否平衡来衡量可持续性的方法^[27]。在此基础上,为了更系统地研究可持续发展背景下的数据驱动设计方法,人们考虑使用经济、社会和环境三个维度对文献进行检索分类,相关研究进展总结见表 1^[28-42]。在这里通过“sustainable”“agenda”“method”“design”“data-driven”“service”等关键词对近 5 年的文献进行了研究,检索的期刊包括《Journal of Cleaner Production》《International Journal of Information Management》等。

社会维度的可持续设计为服务类行业提供了设计框架与方法,着重于通过数据驱动的方法了解与满足用户的情感需求,提升人的生活体验;环境维度的可持续设计为工业、农业以及能源行业提供了基于数据驱动的智能设计系统与框架,研究产品生产的环境绩效,使产品生产过程更加清洁和节能;经济维度的可持续设计为制造业的相关企业提供了管理产品全生命周期的决策方法、制造方法以及优化产品本身的生产制造过程。随着物联网技术和人工智能技术的快速发展,数据驱动的可持续设计演变得更加智能,在生态、产品和服务方面都有广泛研究。以上研究都是在可持续性的背景下,基于生命周期的观点,使用数据驱动的方法提出产品设计或服务设计的相关应用或方法框架,由此更体现出自然、社会和企业密不可分的联系。本文集中关注在可持续背景下,基于产品全生命周期来详细说明数据驱动是如何影响产品的可持续生产过程的。

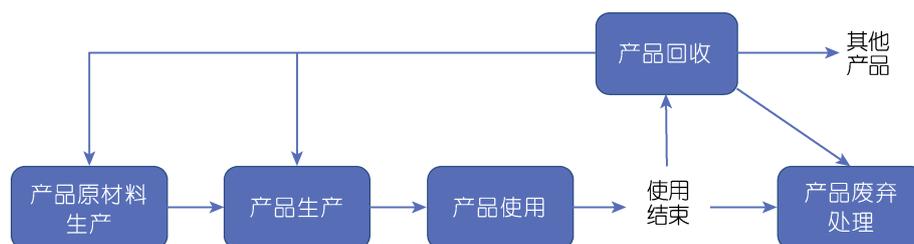


图 1 产品全生命周期

Fig.1 Generic product life cycle

表1 相关研究进展总结
Tab.1 Summary of the findings from the literature review

可持续设计研究维度	行业	研究描述	研究方法	方法验证	解决方法
社会维度	通用	围绕“人工智能+技术思维”研究可持续理念下设计展现的增值效应和新的特征,提出可持续设计识、思、像、构的四个升维路径。	理论	N	N
经济维度	制造业	将产品族生命周期数据融入产品族绿色化再设计实践环节,提出了数据驱动的再设计系统方法,为制造企业可持续发展提供有效指导。	理论	N	N
经济维度	制造业	提出并阐释了生命周期大数据驱动的智能制造服务新模式的技术体系与实现框架,以提升企业对产品全制造流程和全生命周期管理的智能决策能力。	理论	N	N
环境维度 社会维度	服务业	提出了将生态设计和服务设计相结合的生态服务设计方法,促进新服务的环境可持续性,提供更理想的用户体验。	理论 经验	Y	Y
环境维度	制造业	提出一个大数据驱动的可持续和智能增材制造框架,使产品生产更加可持续与清洁。	理论	Y	Y
社会维度	服务业 运输业	提出一种数据驱动方法来设计班车服务,以提升客运与货运服务的效率与便利性。	理论	Y	Y
社会维度	服务业	本研究提供了一种改进的基于感性工程的可持续服务设计应用方法,旨在结合人体工程学了解和满足考虑社会、环境和经济绩效的客户情感需求。	理论	Y	N
经济维度 社会维度	制造业	提出一个数据驱动的可逆框架,以实现可持续智能产品服务系统的开发。	理论	Y	Y
经济维度 环境维度	能源 产业	提出了一个基于能源密集型行业的数据驱动的可持续智能制造框架,使得车间和工厂能够节约能源成本。	理论	Y	Y
经济维度 社会维度	商业	使用动态能力理论提出了一个概念研究模型,研究大数据和绿色供应链对可持续绩效业务增长的影响。	理论	Y	Y
环境维度	工业 农业	使用数据驱动模型评估全球水平辐照度以辅助太阳能系统设计。	理论	Y	Y
环境维度 社会维度	交通业	构建数据驱动的方法系统来识别汽车共享的发展,为可持续交通的发展提供指导。	理论	N	Y
环境维度 社会维度 经济维度	工业 农业	提出一种分析和降低技术产品服务系统的累计能源需求的方法,支持生态可持续性。	理论	Y	Y
社会维度	服务业	讨论了数据驱动服务背景下的分配公平感以及用户对服务的满意度。	理论	N	N
社会维度	医疗业	提出了机器学习辅助的继承数据驱动框架用于养老服务。	理论	Y	Y

3 数据驱动在产品全生命周期的应用

通过延长产品生命周期来实现更高的可持续性已成为产品设计的重要原则,优化产品生命周期中的流程也是企业提高可持续竞争优势的重要目标。在此基础上,相关研究提出在产品开发的循环机制重新设计、再制造、再利用和回收,这对传统的生命周期生产模式(设计、制造、分销、使用和处置)进行了改革,同时使人们的生活方式发生了转变,例如共享和租赁的消费模式被广泛接受。这样的机制可以有效减少不可再生资源的消耗并减轻对环境的影响,同时支持通过产品的重新配置和服务创新延长产品生命周期,并实现更高的可持续性。

当前的研究大多局限于产品生命周期管理的传统视角,着重考虑材料和组件在循环过程中的可持续性。由于产品或服务创造的价值依赖于海量的数据集以及有效的数据分析,因此可持续设计需要数据驱动的方法,包括物联网,大数据分析技术等,使得能够对流通的材料和产品进行更高水平的可追溯性,并最大限度地利用产品生命周期信息用于设计、管理和决策。

3.1 数据驱动下的可持续设计框架

数据驱动的方法满足了设计需求的动态性,这贴合了可持续设计中的循环与动态需求,通过动态收集和分析有意义的产品信息与用户信息,以及生产资源(数据和材料)的重新配置,数据驱动有助于提取更

精确的产品的生命周期信息,使得生产系统能够在产品的整个生命周期更好地执行回收、再设计、再制造、再利用过程,延长生命周期,减少资源消耗,并提出更加智能的决策制定方式,为生产系统实现可持续发展提供一种有前景的方式。

数据驱动下的可持续设计框架见图 2,体现了数据驱动下的产品的制造、使用、再设计、再制造、再利用和回收过程。制造过程通过产品智能生产环境的构建,获取可持续产品制造过程中的各项数据(产品信息),再通过对产品的信息进行量化与分解,获得可靠的原始产品数据。对这部分原始产品数据进行处理获取产品大数据集,并储存在存储系统中,最终通过数据挖掘与预测模块对获取的数据集进行数据分析,以指导产品原型设计与模拟过程,最后应用到产品可持续服务中。回收旨在从使用结束的产品中提取原材料和有用成分,用于再设计和再制造中;再设计过程以逆向设计原则从现有组件中提供升级的设计方法,从而减少资源消耗;再制造过程对使用过的产品进行一系列改造,使其恢复性能;再利用过程是产品根据用户动态需求重新配置的过程,通过再适应用户生活习惯,结合用户生活方式,延长了产品的生命周期。

3.1.1 产品可持续服务

产品可持续服务模块主要描述了产品服务于用户的阶段,它可以被视为向用户提供价值的过程,旨在应用可持续性和循环经济概念通过提供支持网络和基础设施来满足消费者的需求,从一定程度上改变

了用户的生活方式,例如将消费者的行为习惯从购买产品转变为共享或租赁。这样的模式为产品的循环使用提供了可供量化与分析的数据,更利于产品进入回收、再制造、再利用和再设计的循环过程,这潜在地减少了消费对环境的负面外部影响,推动了社会的可持续发展。

3.1.2 生产环境搭建

在产品规划设计阶段里,了解产品在全生命周期中不同阶段的状态和相关数据是数据驱动设计的重要一环。产品的这些信息可以通过构建一个包含传感器和其他智能设备的智能生产环境,使得获取可持续产品的多生命周期数据过程更加便捷。除了产品自身的信息外,用户端的信息也是必不可少的,智能生产环境中需要用户的参与以及对产品的实时反馈。结合产品与用户数据,通过计算、通信和物理系统的一体化设计,能够结合计算进程与物理进程相互影响的反馈循环来实现深度融合和实时交互^[43]。智能生产环境为数据的分析带来了大量的原始数据,根据需求和数据收集情况,既可以直接为产品原型设计提供依据(如用户反馈的信息),又可以为产品的原型设计提供更深入的分析结果(如通过智能设备收集的信息)。

3.1.3 信息量化分解

产品全生命周期包含不同的阶段,数据需要在不同的阶段进行分解,除了根据引入期、成长期、成熟期以及衰退期进行分解,还可以根据数据来源进行更加细化的分解,如设计制造、市场运行状态、废弃或

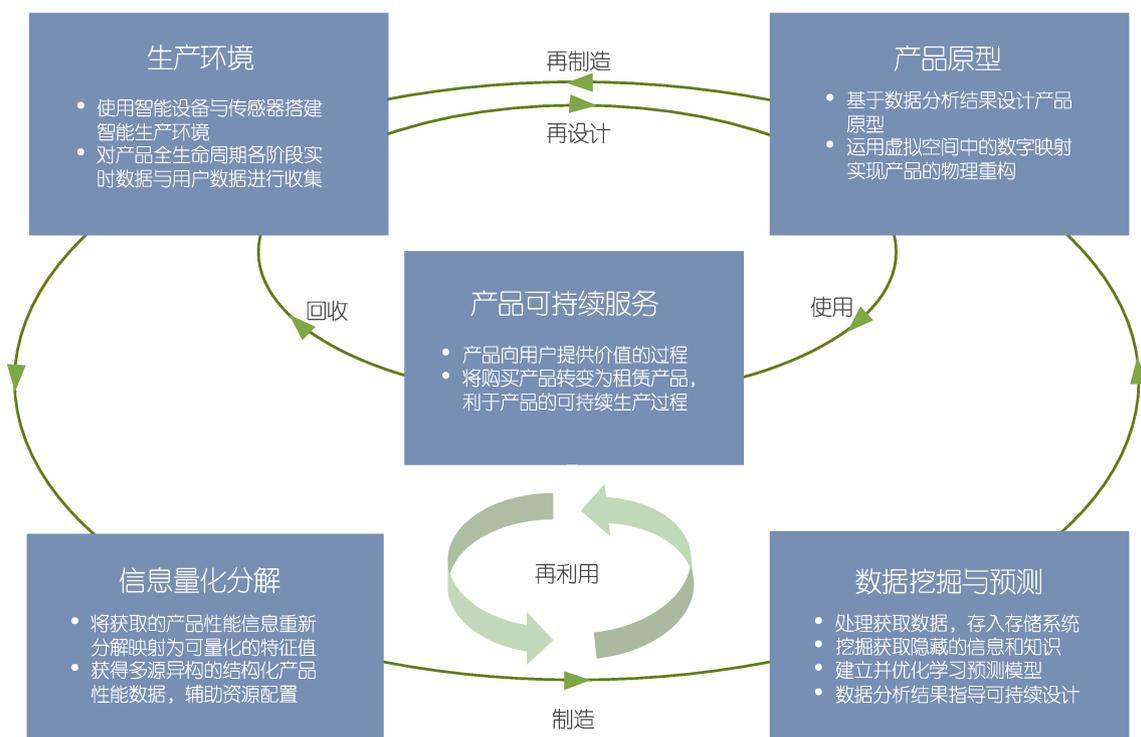


图 2 数据驱动下的可持续设计框架
Fig.2 Data-driven sustainable design

回收再利用、用户体验反馈等。除此之外,为了获得更可靠的大数据协助设计,还需要对产品性能进行量化,具体方式是将其分解映射为相关的特征值,最终通过检测相关的特征值来表述产品特征。这样的量化分解过程有利于大数据的收集和实施,使得设计师能够获得多源异构的再制造数据,也更加有针对性地反映出产品生命周期中潜在的各种不确定性。信息分解使设计师在设计过程中以数据作为指导,将产品生命周期视为多维循环的,关注其在各个阶段减少资源的浪费和提升回收以及利用效率。

3.1.4 数据挖掘与预测

经过生产阶段和全生命周期阶段的数据收集与分解,对原始数据进行了数据处理与存储工作,对数据进行了预处理,提高了数据的整体质量,并将最终获取的数据存入了存储系统。数据的处理和存储是为了获得真实可用的数据集,用于深入分析。为了使收集和经过预处理的数据为设计过程提供更加深层有价值的作用,需要挖掘获取隐藏于其中的信息与知识,可通过机器学习方法对数据进行深入分析,获得更有效的数据分析结果^[44]。具体过程是建立机器学习预测模型,利用获取的数据集进行训练,使用数据分析以及模型训练方法(如聚类、分类)对数据挖掘模型和预测模型的参数进行优化。最终通过多批次的训练优化算法模型,提高数据分析和预测的准确性,并运用数据可视化技术将数据结果直观地呈现,帮助发现规律和找出问题,为可持续设计提供更加有针对性

的指导^[45]。

3.1.5 产品原型

在对数据进行收集和挖掘的基础上,本阶段基于分析获得的信息和知识,不仅实现了符合可持续理念的产品原型,而且在信息空间中实现了产品生命周期的智能虚拟重构仿真,即基于大数据分析 with 预测结果,模拟设计产品原型,实现产品生产的物理重构。这里常使用的技术是数字孪生技术,它能够充分利用数据在虚拟空间中完成数字映射,从而反映出生产实体产品,以及模拟产品全生命周期中各个阶段的资源利用和回收情况。

4 研究挑战

根据上述研究,总结了三个数据驱动可持续设计的应用场景,包括生活方式、生产模式以及资源利用,并根据不同的应用场景总结了研究问题,研究挑战与研究问题见表2。

研究发现,大多数的研究提出了数据驱动的可持续设计框架或方法,但很少进一步讨论其发展以及真正的实现所提出的系统方法,同时在针对方法验证的部分,对于研究用例的选取存在样本量小和数据源单一等局限,如何去扩展现有研究框架和与实践真正结合去验证方法的有效性是有待解决的问题。除此之外,针对社会维度的研究空白较大,大多数的研究只是讨论了企业与产品生产的相关问题,但针对人与产品的相关讨论以及可持续服务的却少有涉及。

表2 研究挑战与研究问题
Tab.2 Research challenges and research questions

数据驱动可持续设计的应用	研究挑战	关键研究问题
生活方式	研究样本具有局限性,导致所提出的系统或框架局限性较大,泛化推广性较差。	如何通过数据收集与分析技术来设计未来更加复杂的系统?
	在人工智能推动可持续设计的升维过程中,存在数据质量,伦理安全和经济时效的问题。	如何发展出自然与人文,人性与智能平衡的智能化设计方案?
	所提出的系统或方法常常对技术框架的考虑更多,而忽略了用户的需求与交互。	如何更好的考虑用户需求,并克服体验障碍?
生产模式	仅从体系框架与实现思路的角度对技术体系进行了阐述和讨论,但未进行有效的验证。	如何将设计系统方法与企业生产模式相结合,验证所提方法的有效性?
	提出的框架与方法只考虑了产品周期的某个阶段,忽略了产品全生命周期。	如何针对产品全生命周期提出合适的决策方法?
	研究所基于的数据源较为单一,且过于依赖量化数据来检验研究框架。	如何扩展可持续设计的研究框架?
资源利用	由于可持续智能产品服务系统的研究领域空白较多,因此开发和实施的过程与算法较为简单。	如何使用更先进的技术解决可持续智能产品服务系统的相关问题?
	对于耗能量的测量数据差异较大,不够准确。	如何使数据驱动模型能够在数据预测中表现出更好的准确性?
	研究用例较小,进一步的研究需要分析更多的用例。	如何扩大对能源资源利用网络的关注?

5 结语

随着全民环境意识的提高, 可持续设计成为产品生产中必不可少的设计理念。企业的数字化转型和产品生产过程的智能化使海量数据在产品的生产使用及产品全生命周期中得以产出。对数据进行收集和挖掘, 可为产品的设计阶段提供依据和指导。通过对经济、社会和环境维度相关研究进行综述, 发现用数据驱动方法延长产品生命周期是实现可持续设计的一种重要方式。数据驱动下的可持续设计框架解释了数据驱动下产品制造、使用、再设计、再制造、再利用和回收的生产过程, 能够用于可持续环境下产品生产模式的优化、生活方式的改善以及环境绩效的提高。结合文献综述发现: 将研究框架与实践相结合是未来亟待解决的问题。期待随着研究进展与实践应用, 数据驱动的可持续设计可以普遍融入产品生产与用户生活中。

参考文献:

- [1] 张永生, 巢清尘, 陈迎. 中国碳中和: 引领全球气候治理和绿色转型[J]. 国际经济评论, 2021(3): 9.
ZHANG Yong-sheng, CHAO Qing-chen, CHEN Ying. Carbon Neutral in China: Leading Global Climate Governance and Green Transition[J]. International Economic Review, 2021(3): 9.
- [2] 曾炳昕, 丁庆国, 朱磊. 碳市场中市场势力对减排技术采用的影响[J]. 中国管理科学, 2021(4): 8.
ZENG Bing-xin, DING Qing-guo, ZHU Lei. The Effect of Market Power in Carbon Market on Emission Abatement Technology Adoption[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021(4): 8.
- [3] HE B. Product Environmental Footprints Assessment for Product Life Cycle[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(233): 446-460.
- [4] WANG J. Big Data Analytics for Intelligent Manufacturing Systems: A Review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021(3): 5.
- [5] BRESCIANI S. Using Big Data for Co-Innovation Processes: Mapping the Field of Data-Driven Innovation, Proposing Theoretical Developments and Providing a Research Agenda[J]. International Journal of Information Management, 2021(10): 237.
- [6] 何媛, 陈亮, 李丰妤. 电子商务用户反馈文本数据的可视化研究与实现[J]. 包装工程, 2020, 41(10): 228-234.
HE Yuan, CHEN Liang, LI Feng-yu. Research and Implementation of Visualization of Text Data Fed Back by E-commerce Users[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(10): 228-234.
- [7] FIORE E. Design for Next Connected Appliances[J]. The Design Journal, 2017, 20(1): 75.
- [8] NACHTIGALL T. Designing Ultra-Personalized Product Service Systems[J]. CoDesign, 2020, 16(4): 274-292.
- [9] JARAMILLO G. Hybrid Practices for Data-Driven Design[J]. The Design Journal, 2019, 22(1): 1163-1175.
- [10] LEE J. Revealing the Design Process[J]. Inventing a Meta-Analysis Method for Documenting, 2019, 2(1): 163-175.
- [11] WANG Y. Does Big Data: Embedded New Product Development Influence Project Success[J]. Research-Technology Management, 2020, 63(4): 35-42.
- [12] PHAM C. The Role of Design Thinking in Big Data Innovations[J]. Innovation, 2021(3): 1-24.
- [13] BALDASSARRE B. Implementing Sustainable Design Theory in Business Practice: A Call to Action[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(273): 113-123.
- [14] BRUNDTLAND G. Our Common Future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development[R]. London: Thames and Hudson, 2010.
- [15] CONNER J. Operating Manual for Spaceship Earth[J]. The English Journal, 1971, 60(3): 403.
- [16] PAPANNEK V. Design for the Real World: Human Ecology and Social Change[M]. London: Thames and Hudson, 1971.
- [17] ASL-NAJAFI J. A Novel Perspective on Closed-Loop Supply Chain Coordination: Product Life-Cycle Approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(289): 125-126.
- [18] CAO H. Product Life Cycle: The Evolution of a Paradigm and Literature Review from 1950-2009[J]. Production Planning & Control, 2012, 23(8): 641-662.
- [19] ZHANG X. Sustainable Product Design: A Life-Cycle Approach[J]. Chemical Engineering Science, 2020(217): 115-118.
- [20] WANG Y. Big Data Driven Hierarchical Digital Twin Predictive Remanufacturing Paradigm: Architecture, Control Mechanism, Application Scenario and Benefits[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(248): 119-129.
- [21] KOBAYASHI H. A Simulation Methodology for a System of Product Life Cycle Systems[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018(36): 101-111.
- [22] BRENNER B. The Perceived Relationship between Digitalization and Ecological, Economic, and Social Sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(315): 128.
- [23] UNITED N. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development[EB/OL]. (2015-09-25) [2021-08-19]. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>.
- [24] ETZION D. Big Data, Management, and Sustainability: Strategic Opportunities Ahead[J]. Organization & Environment, 2016, 29(2): 147-155.
- [25] FUKUDA. Knowledge and Politics in Setting and Measuring the SDG s: Introduction to Special Issue[J]. Glo-

- bal Policy, 2019, 10(S1): 5-15.
- [26] SWARNAKAR V. Development of a Conceptual Method for Sustainability Assessment in Manufacturing[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158: 103-107.
- [27] ELKINGTON J. Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development[J]. California Management Review, 1994, 36(2): 90-100.
- [28] 高云庭. 人工智能 2.0 驱动的可持续设计升维路径研究[J]. 包装工程, 2021, 42(16): 1-16.
GAO Yun-ting. Research on Dimension-raising Path of Sustainable Design Driven by AI 2.0[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(16): 1-16.
- [29] 赖荣桑, 林文广, 肖人彬. 数据驱动的产品族绿色化再设计系统方法研究[J]. 机械设计, 2020, 37(8): 85-90.
LAI Rong-shen, LIN Wen-guang, XIAO Ren-bin. Research on the Systematic Methodology for Data-driven Product Family Green Redesign[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(8): 85-90.
- [30] 任杉, 张映锋, 黄彬彬. 生命周期大数据驱动的复杂产品智能制造服务新模式研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 194-203.
REN Shan, ZHANG Ying-feng, HUANG Bin-bin. New Pattern of Lifecycle Big-Data-Driven Smart Manufacturing Service for Complex Product[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 194-203.
- [31] SIERRA. Designing Sustainable Services with the ECO-Service Design Method: Bridging User Experience with Environmental Performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(305): 127-128.
- [32] MAJEED A. A Big Data-Driven Framework for Sustainable and Smart Additive Manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021(67): 10-20.
- [33] SHU P. Data-Driven Shuttle Service Design for Sustainable Last Mile Transportation[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021(49): 101-104.
- [34] HARTONO M. The Modified Kansei Engineering-Based Application for Sustainable Service Design[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2020(79): 10-12.
- [35] LI X. A Data-Driven Reversible Framework for Achieving Sustainable Smart Product-Service Systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(279): 123-128.
- [36] MA S. Data-Driven Sustainable Intelligent Manufacturing Based on Demand Response for Energy-Intensive Industries[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(274): 123-125.
- [37] SINGH S. Role of Big Data Analytics in Developing Sustainable Capabilities[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(213): 1264-1273.
- [38] FENG Y. Development of Data-Driven Models for Prediction of Daily Global Horizontal Irradiance in Northwest China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(223): 136-146.
- [39] LI M. An Innovative Car Sharing Technological Paradigm towards Sustainable Mobility[J]. Journal of Cleaner Production, 2021(288): 125-126.
- [40] GLATT M. Technical Product-Service Systems: Analysis and Reduction of the Cumulative Energy Demand[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(206): 727-740.
- [41] WAGNER A. Why Free Does Not Mean Fair: Investigating Users' Distributive Equity Perceptions of Data-Driven Services[J]. International Journal of Information Management, 2021(59): 102-103.
- [42] BA T. A Data-Driven Machine Learning Integrated Wearable Medical Sensor Framework for Elderly Care Service[J]. Measurement, 2021(167): 108-113.
- [43] DANUSO A. The Digital Transformation of Industrial Players: A Guide[J]. Business Horizons, 2021(4): 1.
- [44] CHAKRABORTY D. Energy and Carbon Footprint: Numbers Matter in Low Energy and Low Carbon Choices [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(2): 237-243.
- [45] BASBAGILL J. Measuring the Impact of Dynamic Life Cycle Performance Feedback on Conceptual Building Design[J]. Journal of Cleaner Production, 201(164): 726-735.