

面向绿色制造的产品模块化设计研究综述

程贤福¹ 周 健¹ 肖人彬² 刘俊杰¹ 游敏华¹

1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 南昌, 330013
2. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 武汉, 430074

摘要: 阐述了绿色产品生命周期的涵义, 分析了绿色产品生命周期各阶段的特性及关联关系, 对目前存在的绿色模块化设计技术和方法进行了分类总结。根据绿色产品生命周期各阶段研究侧重点不同, 将目前绿色制造模块化设计归纳为面向产品生命周期模块化设计、绿色设计模块化设计、环境意识模块化设计、再制造模块化设计、可拆卸模块化设计、维修模块化设计、回收模块化设计、重用模块化设计及其他模块化设计, 并对其相应的模块化设计方法进行了综述分析。最后展望了今后的研究趋势。

关键词: 模块化设计; 绿色制造; 绿色产品生命周期; 绿色设计

中图分类号: TH122

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2020.21.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review of Product Modular Design from Perspective of Green Manufacturing

CHENG Xianfu¹ ZHOU Jian¹ XIAO Renbin² LIU Junjie¹ YOU Minhua¹

1. Key Laboratory of Conveyance and Equipment, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013
2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: The implication of green product life cycle was expounded, and the characteristics related to environmental attributes of each stage and the association relationship in green product life cycle were analyzed. A classified summing-up was carried out for currently existing multi-methods of green modular design. According to the different emphases of each stage in green product life cycle, the green manufacturing modular design were divided into several aspects: modular design for product life cycle, modular design for green design, modular design for environmental conscious, modular design for remanufacturing, modular design for disassembly, modular design for maintenance, modular design for recycling, modular design for reuse, and other modular designs. Then, its corresponding modular design methods were reviewed and analyzed. Finally, the challenges for further research efforts were projected.

Key words: modular design; green manufacturing; green product life cycle; green design

0 引言

绿色制造 (green manufacturing, GM) 是一种面向可持续发展的现代制造模式, 该种制造模式综合考虑了资源消耗和环境影响, 强调在产品生命周期的各个环节中利用各种绿色技术和管理方法, 使得产品从研发、制造、包装、使用、维修到报废的整个生命周期中, 对环境负面影响小、资源利用率高、综合效益大, 使得企业经济效益与社会效益得到协调优化^[1]。绿色制造是当前世界各国学术界、政府以及工业界广泛关注的热点领域, 是 21 世纪制造业发展的方向。目前, 国内外研究机

构开展了绿色设计、再制造设计、可拆卸设计、可回收设计、轻量化设计等与绿色制造相关的工作。ANASTAS 等^[2]指出绿色工程应关注如何通过科技实现可持续性, 提出了 12 条绿色工程原理作为基于人类健康和环境的新材料、新产品、新工艺及系统设计的指导框架。GHISELLINI 等^[3]回顾了一些国家的循环经济实施经验和循环经济对环境的影响, 针对当前企业生产和客户消费模式, 建议未来应从再生材料、回收再利用、技术融合等角度权衡环境与经济系统的相互作用。BOVEA 等^[4]认为应将环境因素和环境要求以及其他传统要求平衡的多准则方法纳入产品设计过程的早期阶段。

绿色设计理念和模块化设计方法融合, 既可以满足产品多样化需求, 缩短产品开发周期, 快速

收稿日期: 2019-12-11
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51765019, 71462007, 51875220)

应对市场变化,又能改善产品对环境的不利影响,便于产品回收再利用^[5-7],因此,模块化设计可以有效促进绿色制造。产品模块化可以满足绿色产品的快速开发要求,便于拆卸、维修、回收和再制造,减少零部件数量、简化产品结构,以及提高产品重用性和可重构性^[8]。模块化设计已受到广泛的关注,并在机电产品、汽车、家电、飞机、船舶等工业产品上得到了应用。一般的模块化设计方法主要强调产品功能结构上的独立性,依据某个模块化准则,通过某种聚类实现模块的划分^[9]。PISANO^[10]认为资源节约型制造中应该考虑面向环境的设计、面向可拆卸的设计、面向再制造的设计等,提出了面向闭环制造系统工作效率的模块化设计使能方法。BONVOISIN 等^[11]通过对当前模块化设计文献的综述分析,从模块化的驱动、设计原理及模块的度量等方面归纳,提出了“面向 X 的模块化”(modularization for X)概念,指出了未来模块化设计研究的挑战。

1 绿色产品生命周期各阶段特性分析及绿色制造模块化分类

绿色制造对产品全生命周期的资源消耗和环境影响具有决定性的作用。绿色设计的“3R”(reduce, reuse, recycle)原则,不仅要求要减少物质和能源的消耗,减少有害物质的排放,而且要使产品及零部件能够方便地分类回收并再生循环或重新利用。因此,在产品的设计阶段,要考虑零部件多寿命周期服役、材料相容性、可拆解性等因素,以提高产品生命终期(end of life, EOL)的回收、拆解效率及零部件再制造的服役安全寿命。

传统的产品生命周期是“研发—制造—使用—报废”的过程,其产业链是一个开环系统^[12];而理想的绿色产品生命周期是“研发—制造—使用—再循环”的过程,其产业链是一个闭环系统,延伸了传统的产品生命周期,如图 1 所示。

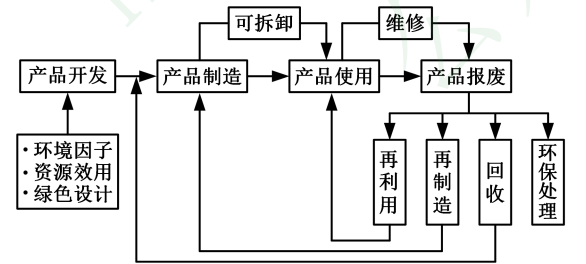


图 1 绿色产品生命周期
Fig.1 Green product life cycle

再制造是绿色制造的重要内容,是制造的有效延伸。维修是维护与修理的统称,是维持机械设备处于良好技术状态的技术措施。再制造与维修都

是把不适合继续使用的产品或设备,通过技术措施恢复其使用性能,使之能够再次投入使用的手段。再制造属于产品维修、报废阶段的一种再生处理,是产品生命周期的延伸,利用了废旧产品中可利用的价值^[13]。回收与拆卸是实施废旧装备再制造的必要环节,拆卸作为实现产品资源回收再制造的关键步骤,是组成产品闭环生命周期的重要环节。面向拆卸与回收的设计要求在装备设计的初期阶段将可拆卸性和可回收性作为结构设计的目标之一,使装备的连接结构易于拆卸,维护方便,并在装备废弃后能够充分有效地回收利用。退役产品的回收利用也是绿色制造的重要环节,它通过再利用、再循环和资源化,提高能源效率、材料效率和环境效益,这也是绿色制造的目的所在。

广义上讲,绿色设计也可称为生态设计或环境设计。一般情况下两者可以被等同对待,但实际操作上有所不同。绿色设计强调产品生命周期的 3R 原则,侧重于减少能源消耗和环境污染、零部件的回收再利用等;而环境设计主要突出产品设计的环境保护意识,更侧重环保性、可回收性、再循环、易处理性等。

绿色设计的核心是环境设计,它延伸了传统的产品生命周期,并使产品生命周期的物流由开环系统变成了闭环系统。再制造设计是落实产品绿色设计的有效措施,是以系统、全生命周期、效益、绿色化理念为指导,对再制造工程进行科学管理和设计的方法。可拆卸设计、可回收设计、可重用设计、维修性设计以及升级和报废均是再制造设计的重要内容,它们是绿色设计的具体实施技术和方法。绿色生命周期设计各阶段特性的关系如图 2 所示。

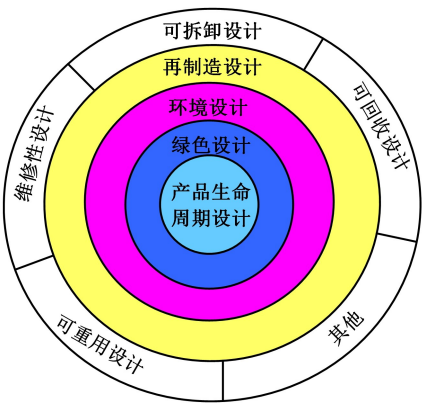


图 2 绿色产品生命周期各阶段特性的关系
Fig.2 The relationship between the characteristics of different stages of green product life cycle

因此,绿色制造模块化设计应从绿色产品生命周期的角度立足,融入绿色设计理念,从环境意

识、再制造、可拆卸、维修、回收、再利用、升级及报废等方面探讨产品设计过程中如何进行模块的划分。根据绿色产品生命周期各阶段研究侧重点不同,绿色制造模块化设计可归纳为如图 3 所示的几种情况。

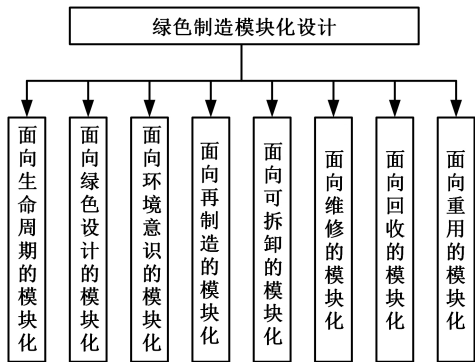


图 3 绿色制造模块化设计分类

Fig.3 Modular design classification of green manufacturing

2 绿色制造模块化设计研究现状

MA 等^[14]从经济、经济-环境、环境、环境-社会、社会和社会-经济可持续性角度回顾了产品模块化设计,本文从绿色制造角度探讨分析模块化设计。

2.1 面向产品生命周期的模块化设计

传统的产品生命周期包括产品研发、设计、制造、装配、测试、销售、使用、维护、报废和处理几个阶段。产品生命周期设计应考虑产品的孕育期(社会需求、规划、研发、设计)、生产期(材料选择制备、制造、装配、测试)、储运销售期(存储、包装、运输、销售)、服役期(使用、维护)和淘汰期(回收、再利用、报废),全面优化产品的功能/性能、生产效率、品质/质量、经济性、环保性和能源/资源利用率等目标函数,求得其最佳平衡点^[15]。

面向产品生命周期的模块化设计,从产品生命周期的整体考虑,在功能结构模块划分的基础上,定义与设计目标相关的生命周期因素,分析生命周期各因素对产品零部件交互的影响,对零部件进行聚类以形成模块,从而在保证产品功能结构独立性的同时,兼顾生命周期过程的制造、装配、拆卸、维修、回收及再利用等属性。有许多研究者提出了相应的方法。吕利勇等^[16]通过分析产品生命周期各因素对零部件功能交互、结构交互、工艺、维修、升级和重用的影响,提出了一种面向生命周期的产品模块化分解方法。田夏^[17]分析了产品设计中与环境相关的因素,提出了基于种群遗传算法的产品全生命周期模块化设计方

法,以提高产品在拆卸与回收利用方面的属性。郭卫等^[18]从面向生命周期的角度出发,以几何、功能、物理为约束,综合考虑 8 个绿色模块准则,构建交互作用矩阵,提出了一种面向产品全生命周期的绿色模块划分方法。苏铭等^[19]先从功能角度进行模块划分,再从生命周期的角度(设计、制造、装配、回收 4 个阶段零部件的交互影响)对划分结果进行优化,但未对产品生命周期特征属性的量化进行阐述。陈兵等^[20]针对清障救援车辆,考虑了功能、结构、材料、使用寿命、接口及回收利用等属性生命周期特性,提出了基于层次分析和模糊聚类的模块划分方法。

GU 等^[21]考虑装配性、维修性及回收性等生命周期工程的环境属性,提出了面向生命周期工程的产品集成模块化设计方法,将其分为问题定义、交互分析和模块划分三个阶段,并针对每一阶段设计目标的模块划分结果进行综合对比分析。GERSHENSON 等^[22]考虑了产品生命周期中制造、装配、服务和回收等因素,基于零部件的相似性和依赖性提出了面向生命周期的模块化设计方法。UMEDA 等^[23]综合了维修性、升级性、重用性和回收性等与产品生命周期相关的属性,提出了面向产品生命周期的确定模块化结构的方法,并评估了模块的几何可行性。YU 等^[24]综合考虑传统的功能相关属性以及产品生命周期相关的属性,分析了各零件间的关联关系,建立了模块的适应性聚类函数模型,采用成组遗传算法对模块进行了划分。YAN 等^[25]针对绿色制造可持续发展意识的增强,在传统的 3R 原则基础上融入再恢复、再设计及再制造使之成为 6R,并将其作为可持续设计的基本准则,再考虑环境、经济及社会因子,提出了面向可持续设计的产品模块化划分方法。JI 等^[26]提出了一种面向产品生命周期的有效性驱动模块化设计方法,考虑设计、制造、装配、使用、维修及回收等环境属性,在不同生命周期阶段模块划分粒度权衡时通过有效性进行评价。

由于产品生命周期内包含了产品从研发到报废的整个过程,而每种模块化方法的侧重点不同,因此很难建立一个完善的评价模型,这也是面向产品生命周期模块化设计的一个难点。

2.2 面向绿色设计的模块划分

绿色设计(green design)是一种以环境资源为核心概念的设计方法,即在产品整个生命周期内,优先考虑产品的资源效率和环境属性,同时保证产品设计应有的基本属性(基本性能、使用寿

命、质量等)。绿色设计有广义和狭义之分,广义绿色设计要求考虑产品全生命周期内的各种与环境有关的属性,如资源利用率、可拆卸性、可回收性、可维修性、再利用性、易处理性等。因为广义绿色设计涉及到产品生命周期的每一阶段,因此有时难以实现,而狭义绿色设计立足于现有的技术水平,从生态资源的可持续性角度考虑其中几个主要的环境属性,以“绿色性”或“绿色度”为衡量指标,更容易实现。

面向绿色设计的模块化方法(modularization for green design)强调将绿色设计思想和模块化设计中的功能分析方法相结合,同时满足产品的功能属性和环境属性,缩短产品研发与制造周期,快速应对市场变化,减少对环境的不利影响,易于进行产品重用、升级、维修、拆卸、回收和报废处理^[5]。

绿色模块化设计可以有效提升绿色再制造能力,已引起研究者的关注。李方义等^[27]提出了一种产品绿色模块化设计方法的研究框架,总结了模块化在绿色设计中的应用特点,探讨了利用模糊数学、图论及层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)分析法研究产品的绿色模块化多目标决策。唐涛等^[5]提出了绿色模块化设计方法并简要分析了其设计流程,引入重用性、升级性、维护性、回收性和处理性 5 个绿色准则,利用零件合并准则对零件进行合并,利用功能准则和绿色准则对模块进行划分。张雷等^[28]以实现大批量定制模式下的绿色设计为目标,从拆卸性、回收性、环境影响以及经济性方面量化产品族绿色性能,提出了一种面向绿色设计的产品族规划方法。鲍宏等^[29]以绿色产品的满意程度为目标,结合模块化思想、环境化质量功能配置和通用物料清单方法,分析生命周期各阶段的绿色特性,提出了一种面向多样性和绿色性需求满意的产品配置设计方法。吴永明等^[30]在产品族核心系统功能模块划分的基础上,分析了产品生命周期中的动态要素,考虑可维护性和经济性,提出了一种面向产品族设计的模块动态规划方法。

TSENG 等^[31]将接触类型、结合类型、工具类型和接触方向作为零件联络强度准则,基于绿色材料成本分析和成组遗传算法(group genetic algorithm, GGA),提出了绿色生命周期工程模块化设计方法。SMITH 等^[32]考虑了材料相容性、部件可回收性和可拆卸性等与产品绿色设计的环境因子,将绿色设计引入模块化设计中,利用原子理论(atomic theory)进行产品绿色模块化划分。JI 等^[33]从材料效率角度,建立了模块主从优化模

型,提出了绿色模块化设计方法。YANG 等^[34]为改善电子电气设备的维修性、重用性和回收性,提出了一种面向生命周期工程的模块化生态设计方法,并考虑再设计中功能和结构的风险约束,利用成组遗传算法进行了模块的多目标优化。CHANG 等^[35]为平衡产品开发与生态友好性,结合绿色质量功能配置和设计结构矩阵,提出了面向绿色设计的模块化设计系统化方法。

绿色模块化设计的绿色准则涉及因素较多,主要考虑与资源消耗和环境影响有关的因素,而从上述文献可以看出,每种方法对绿色准则的含义概括都不一样,因此,今后有必要进一步探索绿色模块化设计中绿色准则的判断依据和模型。

2.3 面向环境意识的模块化设计

人类步入工业社会以后,工业得到空前的快速发展,环境问题不断凸显,粗放式经济增长方式消耗了大量的不可再生资源,同时也导致了严重的环境污染。产品设计与环境保护息息相关。因此,环境意识上升到产品设计过程中的重要地位,受到世界各国的高度重视。环境意识设计(environmental conscious design)亦称环境设计(design for environment)、生态设计(ecological design),以产品环境属性(环保性、可回收性、再循环、易处理性等)作为设计目标,进行产品开发与设计。

面向环境意识的模块化设计(modularization for environment)要求在产品的设计过程中同时满足产品的功能、结构和报废后的可回收属性,增强模块化产品的绿色性能,强调考虑产品的减量化(reduce)、重用性(reuse)和回收性(recycle)^[36]。李中凯等^[36]从组件的功能、结构、寿命、材料和回收相似性角度,建立合成的模块化设计结构矩阵,提出了一种基于成组遗传算法和最小描述长度优化目标的环境意识模块划分方法。魏巍等^[37]提出了基于环境资源因子的产品平台模块划分方法,集成绿色设计、制造工艺过程、回收重用等整个生命周期的产品信息,将环境资源因子纳入到零部件功能-结构耦合特性的聚类分析过程中。

LI 等^[38]提出了面向环境的模块化设计方法,考虑拆卸性、维修性、材料选择、回收及处理 4 方面的环境因子,基于模糊连接图描述产品的结构,利用层次分析法确定环境目标、功能及其他产品关注的性能之间的联系。QIAN 等^[39]在产品模块化分析中引入环境意识,考虑了 8 个环境因子准则,利用完全层次分析法确定环境因子准则的优先级,建立了一种半定量化的环境因子模块化

分析模型。SHENG 等^[40]考虑数控机床生命周期的环境资源意识和可持续性,提出了基于模糊 C 均值聚类算法的模块化设计方法,利用模拟退火和遗传算法分析模块划分方案。KOBAYASHI 等^[41]认为产品的模块化可以提高产品的回收性、重用性和维修性,从而改善产品的环境属性,建立模块配置和产品功能结构的双层优化模型,提出了基于层次遗传算法(hierarchical genetic algorithm, HGA)的模块化设计方法。SAKUNDARINI 等^[6]分析了产品生命终结策略与模块化设计间的联系,为减少退役产品对环境的影响,提出了具有不同生命终结策略的模块化设计方法。YOU 等^[42]为减少产品对环境的影响,基于原子理论和模糊 C 均值法提出了多目标绿色模块化设计方法。

2.4 面向再制造的模块化设计

再制造工程是以产品的生命周期设计和管理为指导,以优质、高效、节能、节材、环保为目标,以先进技术和产业化生产为手段,对废旧产品进行修复和改造的一系列技术措施或工程活动的总称^[43]。再制造设计是以废旧产品为对象,从全生命周期和绿色化角度对再制造全过程进行规划,最终形成再制造方案的过程。

面向再制造的模块化设计(modularization for remanufacturing)就是在产品模块化设计过程中考虑零部件的再制造性,使产品设计同时满足功能特性以及可拆卸、可回收、可重用、可维修、可升级、可装配性以及环境属性等再制造性指标和要求。产品的再制造性和模块化设计关系密切。面向再制造的模块化设计强调产品设计时在保证基本功能的前提下,优先考虑产品的再制造性,将产品末端的再制造因素作为整体设计的一部分进行系统的考虑,这样才能充分保证装备良好的再制造能力。

再制造是制造的有效延伸,被国家列为战略性新兴产业。采用模块化设计对产品的再制造水平有较大的促进作用,因此,再制造产品的模块化也受到学术界和工程界的青睐。杨继荣等^[44]分析了面向再制造工程的模块化设计方法的内涵,介绍了再制造绿色度及模块度的评价模型主体框架,但未说明如何进行面向再制造的模块化设计。刘涛等^[45]考虑产品生命周期各阶段特性和再制造设计零部件相似性,提出了一种面向主动再制造的机电产品模块化设计方法。杨勤等^[46]针对电取暖炉开发,利用基于再制造的模块化设计方法对电取暖炉进行了模块优化。王蕾等^[47]分析

了再制造和服务的特点,提出了再制造服务资源模块化组织模式,建立了多粒度的再制造服务资源模块聚类优化模型。刘志等^[48]以产品模块化水平为决策变量,分析了其对新产品研发费用和再制造成本的影响,研究了再制造模式下的最优模块化水平和制造/再制造生产决策。

TCHERTCHIAN 等^[49]认为,为了更好地实现产品的再制造,传统的产品体系应向模块化体系演变,建立了产品模块再制造、回收及升级的体系结构,从模块各种用途的演化、必要的功能及短期和长期的升级功能 3 个层面进行了改善。ALLWOOD 等^[50]从产品长效性、模块化和再制造、零部件再利用及材料减量化 4 个策略探讨了通过材料的高利用率减少材料需求的方法。TCHERTCHIAN 等^[51]通过提高再制造和回收模块的比例来延长产品终结寿命,基于成本和环境影响准则确定再制造和回收模块。CHENG 等^[52]针对重型机床再制造的生态性和经济性,提出了一种面向再制造的模块化设计方法,在公理设计 4 个设计域的基础上扩展出了再制造域,分析了重型机床结构域和再制造域中设计参数的相似性,然后将设计矩阵转化为设计结构矩阵,基于原子理论聚类算法实现模块的划分。

面向再制造的模块化设计主要研究产品模块化设计中考虑零部件的再制造性,强调模块的可拆卸性、回收性、升级能力、再利用水平,对模块的再制造性评价还缺乏统一的认识,而且各种方法考虑再制造性与产品功能结构间的关联关系差异性较大,这也是该研究比较欠缺的地方。

2.5 面向可拆卸的模块化设计

可拆卸设计(design for disassembly)是一种绿色设计方法,出发点是方便地回收再利用产品,最大限度地减少对环境的污染。拆卸是回收再利用的基础,是实现产品再制造的前提。产品的可拆卸性对提高材料再循环利用率、资源使用效率及再制造能力,减少环境污染起着关键作用。面向可拆卸的模块化设计(modularization for disassembly)是以提高产品可拆卸性为目的,在产品模块化设计过程中,考虑模块及零部件的拆卸问题,通过回收、维修、重用、再制造等手段,将传统设计扩展到全生命周期设计。

当前文献对产品的拆卸模型和拆卸序列规划研究较多,对可拆卸的模块化设计研究相对较少。潘晓勇等^[53]构建了层次概率模糊认知图的数学模型,利用该模型生成产品全拆卸中拆卸序列,较好地解决了拆卸稳定性问题。钟艳如等^[54]基

于零部件的约束关系建立了产品混合图拆卸模型,将模块划分准则整合到混合图模型中,可解决模型中边与顶点的“组合爆炸”问题。郭伟祥等^[55]考虑结构独立性、功能性和材料回收性,建立了模块化产品拆卸模型,提出了一种基于模块化思想的拆卸序列规划方法。李名^[56]分析了影响产品可拆卸性的因素,基于设计结构矩阵构建了可拆卸模块化准则,提出了一种面向可拆卸的产品模块化设计方法。魏巍等^[57]量化了可拆卸属性,以内聚度、耦合度和可拆卸度为准则,提出了一种基于改进免疫克隆算法的产品模块划分方法。

KOBAYASHI 等^[58]基于零部件生命周期属性的相似性分析,考虑产品功能结构的层次特点,提出了面向可拆卸的模块化设计方法。SMITH 等^[59]以最大化产品质量、最小化产品成本及最小化环境影响为目标,提出了面向绿色产品设计的并行拆卸方法,基于模块化设计理论和递归规则进行从产品中移除 2 个及以上的闭塞或连锁零部件。为了更好地提高 3R(再回收、再利用、减量化)能力,HUANG 等^[60]针对电器电子设备对环境的影响,提出了一种考虑 3R 能力的产品模块化方法和产品拆卸模式,通过确定理想的产品拆卸方式并由此构建零部件矩阵进行模块化划分。WANG 等^[61]针对机床的再制造,综合考虑了材料选择、再制造工艺性能、使用和维修性能、经济效益及功能和结构的可行性,提出了面向拆卸和再制造的模块化设计方法。

2.6 面向维修的模块化设计

维修性即产品在规定的条件和规定的时间,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复其规定状态的能力。可维修性设计是设计质量中一个非常重要的内容,它把维修性设计归入了产品设计过程。面向维修的模块化设计(modularization for maintenance)是指在产品设计中同时考虑模块度和维修性,使产品在出现故障后能快速实现模块配置,提高模块化产品的可修复性,缩短平均修复时间。

李婷婷等^[62]分析了影响维修性的相关因素,考虑了零部件拆卸的难易程度,提出了面向维修的模块划分方法。李超等^[63]针对机务准备维修流程结构复杂、不能很好满足战训任务多样化需求的问题,提出了基于模块化理论的机务准备维修流程模块化优化方法,可增强维修流程柔性。程松等^[64]提出 5 种可维修性评价指标,分析了维修指标关联关系,建立了维修性属性矩阵,并对通

信开关电源整流器进行了底层模块化划分。郑维强等^[65]在复杂装备的设计过程中,结合维修驱动要素和策略选择,从维修成本、维修复杂度和维修效率等方面量化维修特性,提出了一种面向维修的复杂装备模块化设计方法。陈思益^[66]以平均故障间隔时间和平均修复时间来衡量地铁转向架的维修性,将具有相似维修属性的零部件聚类为一个模块,提出了面向维修的地铁转向架模块划分方法。

TSAI 等^[67]根据零部件间的几何约束、机械强度、能量流和信息流,建立了系统的层次结构,考虑理想的维修周期和总的维修成本,提出了面向维修性的模块化设计方法。JOO^[68]认为模块化设计的优点之一就是便于支持服务,开发了面向模块化部件的预防性维修的动态设计方法。GOSWAMI 等^[69]针对模块化产品的可修复性,考虑不同模块的平均修复时间,开发了包含设计、供应链、制造、市场、质量保证及售后支持 6 个方面的综合风险评估框架,利用贝叶斯网络方法评价了模块化产品的风险。GAO 等^[70]在产品模块化设计过程中不仅考虑了功能相关属性,还考虑了维修相关属性,构建了产品模块化策略的可靠性和经济性评估模型,以预防性维修间隔和预防性维修经济性为目标进行了模块化划分。ZHENG 等^[71]提出了一种面向可维修设计的模块化准则,以模块的内聚度和耦合度为约束,构建了维修性多目标模型。

维修性设计目前已得到较广泛的关注,但面向维修的模块化研究尚未引起足够的重视。实际上不少产品如汽车、工程机械、机床、家电等都采用了模块化维修方法,该研究的展开对再制造产品的模块化设计有极大的推动作用。

2.7 面向回收的模块化设计

随着人们对环境保护意识的逐步提高,产品的回收利用已经成为世界各国制造业所面临的一个不可忽视的问题。产品回收是一个复杂过程,涉及产品的拆卸、可用零部件的回收、材料的转化再利用以及有害部件的处理等方面,一般有 3 种回收方式:产品及零部件的重用与再制造、材料回收、废弃物处理^[72]。可回收产品设计是从回收废旧产品的角度出发,在产品生命周期设计的初始阶段对产品报废后的回收再循环进行充分考虑,便于企业更好地回收再利用,减少对环境的影响。

面向回收的模块化设计(modularization for recycling),就是在模块化设计时,重点考虑产品的可拆卸性、可回收性及资源利用率,使产品在寿

命终结时回收之后容易拆卸为不同的模块,能够很好地完成回收再利用,从而在很大程度上解决环境污染与能源消耗问题,实现绿色生产^[73]。黄海鸿等^[72]以寿命分析、材料相容性、经济性、环境影响、功能与物理交互 5 个方面为模块化准则,提出了基于传递闭包法的可回收产品模块化设计方法。张宠元等^[73]从易于拆卸、可主动回收处理、经济和环境准则 4 个方面度量主动回收度,以主动回收度、内部聚合度以及外部耦合度为优化目标进行模块划分。权妮等^[74]认为面向回收的模块化设计要考虑零部件的可拆卸性,预留模块接口以备升级所需,探讨了面向主动回收的模块化设计准则和体系结构。陈铭^[75]以材料效率为主线,分析了汽车回收利用过程中的报废拆解规划、发动机再制造、动力电池的梯次利用、汽车破碎残物的能量回收利用等关键问题。

MOK 等^[76]分析了大批量定制背景下产品回收过程面向客户的设计(DFC)、面向装配的设计(DFA)、面向变型的设计(DFV)及面向拆卸的设计(DFD)的概念,以回收时最短的拆卸时间和最少的拆卸数量为目标,提出了一种面向拆卸和回收的模块化划分方法。TSENG^[77]分析了废弃产品回收利润和回收成本间的关系,提出了面向产品寿命终结的模块化设计方法,利用成组遗传算法对回收产品进行模块化,并对产品拆卸成本和回收利润进行了评估。YAMADA 等^[78]为了减少废物,建立了产品生命周期的回收过程模型,在制造计划、模块化设计和多变量过程验证中考虑了产品回收性能。BADURDEEN 等^[79]考虑产品回收后的再利用、再制造和再循环策略,为了最大化材料和能量回收,减少对环境的影响,降低回收成本,提出了一种产品多生命周期的配置设计方法。

从上述研究成果来看,面向回收的模块化设计主要强调材料的转化再利用和回收经济性,而如何保证最大程度再制造,从而提高资源利用率及减少对环境的影响,则需进一步探讨。

2.8 面向重用的模块化设计

为了使设计的产品更加环保、资源重复利用率更高,再循环经济模式越来越受到企业重视。再循环是指将废旧产品回收能够重新利用资源的过程,此过程可有效减少废弃物数量,增加可用原材料资源数量,减少对原生矿藏的开采。设计再利用是指在新产品设计过程中尽可能利用现有的模块,以便有效地克服设计复杂性带来的困难、重用设计资源、提高设计效率和设计质量^[80]。可回收设计与可重用设计是有区别的,可重用设计

更多的是从设计知识和资源角度出发,而可回收设计则强调材料的循环利用。产品的模块化是提高设计再利用率的主要方法。面向重用(再利用)的模块化设计(modularization for reuse)就是在产品模块化设计过程中考虑知识重用、资源重用、再循环利用等因素,提高模块化产品零部件或材料的再利用能力。

曹华军等^[81]分析了废旧零部件重用与再制造零部件定制设计间的关系,建立了再制造系统的优化配置模型,提出了面向资源重用的再制造定制设计关系优化配置方法。张雷等^[82]将知识重用方法引入到绿色产品的概念设计中,基于功能域、行为域、结构域与绿色设计域进行可拓物元表达,采用 K 均值聚类对绿色设计单元实例进行配置。湛炎辉^[83]利用模块库相似度计算建立相似度矩阵,并对模块库进行聚类分析以消除冗余的模块实例,进而提高模块的可重用度。徐婧欣^[84]通过模块化设计中的标准化处理方法对不规则的零料进行标准化再利用设计,以达到节约资源、保护环境的目的。侯昆峰等^[85]考虑了兼容性(包括维护、零件寿命、材料和回收价值兼容性)、拆卸性(拆卸时间和拆卸力)、结构连接方式、可达性/定位性和装配性 9 个生命周期阶段的环境属性,提出了基于相似性和独立性分析的绿色模块化重设计方法。

KIMURA 等^[86]为了减少工业产品的环境负担,考虑零部件的功能稳定性、可升级性、寿命、质量、可维修性及易处理性等再利用因素,提出了在逆向制造中以零部件再利用为目标的产品模块化设计。WATANABE 等^[87]为解决闭环制造中产品功能和重用性的矛盾,考虑客户需求满意度和环境影响,基于联合分析和质量功能配置提出了提升模块重用性的方法。MEEHAN 等^[88]探讨了模块化设计原理支持工程设计重用的能力,分析了模块化设计与重用原理的关系,提出了模块化设计原理扩展支持重用设计的方法。YANG 等^[89]将生态设计通过模块化方式融入产品族设计中,分析了产品生态性能的公共性影响,考虑废弃产品的重用性和回收性,建立了产品族环境性能模块化模型。

2.9 其他方面的模块化设计

除了上述几类模块化设计,还有一些其他类型的模块化设计。如当产品设计因技术改造升级、产品报废处理、不符合可持续性要求,或者需通过使用新材料、新技术、新工艺等提升产品的性能、延长产品的使用寿命、减少环境污染等情况,

本文将这些主题的模块化设计都归结为其他情况。如高一聪等^[90]从回收拆解作业效率、回收拆解作业收益和回收拆解作业环境影响 3 个方面,对机械产品报废处理过程中的关键绿色质量进行了分析和度量,提出了面向寿命终结阶段产品设计绿色多准则优化方法。陈小斌^[91]分析了机电产品全生命周期的绿色属性及功能结构与环境要素的关系,建立了以组件集合、组件属性以及结构为要素的绿色模块化信息模型,对机电产品进行了绿色模块化划分。孟凯等^[92]建立了以再生收益、模块属性与组合效应最大化为目标的多目标优化模型,兼顾模块寿终质量的影响,提出了多产品再生模块与产品寿命终期方案同步优选方法。张付英等^[93]从生命周期和功能流两个角度提出了一种可持续设计的模块划分方法,结合 6R 原则和产品生命周期特征,从可持续性设计角度对划分结果修正获得最终划分结果。

XING 等^[94]利用模糊集理论构建了产品升级性的数学模型,从技术、功能、物理和结构的适应性方面考虑产品的升级难易程度,以产品变型相容性、扩展利用的适应性和面向生命周期的模块化 3 项指标来评价产品的升级潜力。SELIGER 等^[95]考虑产品生命周期准则开发了模块化配置软件工具,提出了一种数学模型实现模块的多目标优化。MA 等^[96]认为产品的竞争性很大程度上取决于一些关键零部件,结合关键零部件的规范性提出了一种可持续模块化设计方法,基于模块结构可持续指标(module structure sustainability index, MSSI)来确定最优的模块结构。FADEYI 等^[97]将型芯清洗和产品服务引入产品的模块化中以改善再制造产品服务系统,构建了模块变体的优化模型,评估了模块对并利用模糊推理系统获得了模块对的相容性指标。MUTINGI^[98]将可持续性纳入产品的生命周期中,通过分析设计因素及其对产品经济性、环境和社会不确定性影响,提出了一种基于模糊遗传算法的模块化设计方法。SONEGO 等^[7]从产品生命周期角度探讨了可持续设计与模块化的交集,强调了模块化对可持续设计的益处,同时指出了模块化的问题及与可持续设计的衔接紧密性不够的问题。KIM 等^[99]从产品恢复角度提出了一种面向生态的模块化设计方法,以接口复杂性、材料相容性和使用寿命相似性为可持续模块化驱动准则。MESA 等^[100]探讨了可持续开放式结构产品的模块化设计模型,该模型不仅面向制造而且也面向使用和末端处理阶段。

3 分析与讨论

本文主要以绿色产品生命周期的相关文献为基础,对国内外绿色模块化设计的研究现状进行系统的综述,概括了绿色制造的战略意义以及模块化设计有效促进绿色制造的作用,分别以绿色产品生命周期的各阶段特性为主题,从产品生命周期、绿色设计、环境意识、再制造、可拆卸、维修、回收、重用等方面进行了分类阐述。研究者围绕绿色产品生命周期模块化设计提出了许多方法,其中的再制造模块化设计更是成为近十年来产品设计的研究热点,是绿色制造的有效战略之一,本文涉及文献的梳理统计如表 1 所示。

表 1 绿色模块化设计文献分类
Tab.1 Categories of publications by green manufacturing subjects

绿色模块化设计主题	研究者
面向生命周期的模块化	陈兵等 ^[20] ;苏铭等 ^[19] ;郭卫等 ^[18] ;田夏 ^[17] ;吕利勇等 ^[16] ;YAN 等 ^[25] ;JI 等 ^[26] ;YU 等 ^[24] ;UMEDA 等 ^[23] ;GERSHENSON 等 ^[22] ;GU 等 ^[21]
面向绿色设计的模块化	吴永明等 ^[30] ;鲍宏等 ^[29] ;张雷等 ^[28] ;唐涛等 ^[5] ;李方义等 ^[27] ;JI 等 ^[33] ;CHANG 等 ^[34] ;YANG 等 ^[35] ;SMITH 等 ^[32] ;TSENG 等 ^[31]
面向环境的模块化	魏巍等 ^[37] ;李中凯等 ^[36] ;YOU 等 ^[42] ;SAKUNDA-RINI 等 ^[6] ;SHENG 等 ^[40] ;KOBAYA-SHI 等 ^[41] ;QIAN 等 ^[39] ;LI 等 ^[38]
面向再制造的模块化	王蕾等 ^[47] ;刘志等 ^[48] ;杨勤等 ^[46] ;刘涛等 ^[45] ;杨继荣等 ^[44] ;CHENG 等 ^[52] ;TCHERTCHIAN 等 ^[51] ;TCHERTCHIAN 等 ^[49] ;ALLWOOD 等 ^[50]
面向可拆卸的模块化	魏巍等 ^[57] ;李名 ^[56] ;钟艳如等 ^[55] ;郭伟祥等 ^[54] ;潘晓勇等 ^[53] ;WANG 等 ^[61] ;HUANG 等 ^[60] ;SMITH 等 ^[59] ;KOBAYASHI 等 ^[58]
面向维修的模块化	陈思益 ^[66] ;程松等 ^[64] ;郑维强等 ^[65] ;李超等 ^[63] ;李婷婷等 ^[62] ;ZHENG 等 ^[71] ;GAO 等 ^[70] ;GOSWAMI 等 ^[69] ;JOO ^[68] ;TSAI 等 ^[67]
面向回收的模块化	陈铭 ^[75] ;张宠元等 ^[73] ;权妮等 ^[74] ;黄海鸿等 ^[72] ;YAMADA 等 ^[78] ;BADURDEEN 等 ^[79] ;TSENG ^[77] ;MOK 等 ^[76]
面向重用的模块化	侯昆峰等 ^[85] ;徐婧欣 ^[84] ;张雷等 ^[82] ;谌炎辉 ^[83] ;曹华军等 ^[81] ;YANG 等 ^[89] ;MEEHAN 等 ^[88] ;WATANABE 等 ^[87] ;KIMURA ^[86]
其他	张付英等 ^[93] ;孟凯等 ^[92] ;陈小斌 ^[91] ;高一聪等 ^[90] ;SONEGO 等 ^[7] ;MUTINGI 等 ^[98] ;FADEYI 等 ^[97] ;MA 等 ^[96] ;SELIGER 等 ^[95] ;XING ^[94] ;KIM 等 ^[99] ;MESA 等 ^[100]

由表 1 可以看出,传统的生命周期模块化设计研究展开较早,绿色生命周期各阶段特性都有相应的模块化设计文献,且主要都集中在近十年。此外,这些模块化主题也并非独立,如在面向回收的模块化设计中就考虑了可拆卸和再利用设计,面向再制造的模块化设计包含了可拆卸、回收和

重用等属性,面向绿色设计的模块化划分则与环境意识、再制造、拆卸性、回收和重用等有关联。但是,它们的侧重点不同,如面向绿色设计的模块化划分着重考虑产品环境属性,其主要准则之一是绿色度。

作为绿色制造的有效支撑技术,模块化设计研究的理论成果较为丰富,其实际应用也已在许多行业得到了较为广泛的推广。尽管模块化技术比较成熟,绿色模块化也得到了重视,但绿色制造需要考虑产品生命周期各阶段的特性,如资源利用率、材料效率、再制造性、可拆卸性、回收性、维修性、再利用性、易处理性等,导致全生命周期模块化设计涉及因素较多,关联关系复杂,实施难度较大。随着绿色制造不断深化,绿色生命周期也将进一步扩展,模块化与绿色化在很多领域也存在融合的趋势。今后的研究趋势包括如下几个方面:

(1)现有的再制造模块化设计大多数是针对退役产品的,经常会出现关键零部件过度使用的情况。为了使产品在寿命终结后有更好的再利用价值,有研究者提出了在役产品的主动再制造。主动再制造需通过对产品服役规律进行分析,预测主要零部件的剩余寿命和回收价值,判定主动再制造时机,当产品服役到预设时间点时,再进行再制造,以保证零件在整个服役周期内均具有更佳的性能。主动再制造丰富了再制造模块化设计理论,开展产品主动再制造模块化设计,将使用寿命、回收价值、材料等相似的零件划分在同一模块内,更好地解决环境污染与资源利用问题,更易实现绿色再制造。

(2)绿色产品生命周期设计涉及各阶段特性因素太多,模块划分可能会出现功能、结构或特性指标的冲突,应考虑环境目标和功能目标的折中,建立并完善绿色制造模块化综合体系,合理确定模块划分的有效度。

(3)分析绿色生命周期设计各阶段特性间的关联关系,建立产品层次模块化体系结构,提出更有效的模块化聚类算法;探索绿色制造模块化的最优粒度和耦合关系,研究模块产品的演化驱动因素及模块间的变更传播影响。

(4)随着信息化的飞速发展,模块化设计向智能化发展,需要利用大数据有效挖掘客户的潜在需求,以更快响应市场需求。如何利用大数据思维,分析绿色生命周期各阶段特性间的内在联系,从海量数据中挖掘有价值的信息来指导模块化设计也是值得关注的研究方向。

参考文献:

- [1] 刘飞. 21 世纪制造业的绿色变革与创新[J]. 机械工程学报, 2000, 36(1):7-10.
LIU Fei. Green Changes and Innovation of the Manufacturing Industry in Twenty-first Century[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(1):7-10.
- [2] ANASTAS P T, ZIMMERMAN J B. Design through the 12 Principles of Green Engineering[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(5):94A-101A.
- [3] GHISELLINI P, CIALANI C, ULGIATI S. A Review on Circular Economy: the Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114(7):11-32.
- [4] BOVEA M D, PÉREZ-BELIS V. A Taxonomy of Ecodesign Tools for Integrating Environmental Requirements into the Product Design Process [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 20(1):61-71.
- [5] 唐涛, 刘志峰, 刘光复, 等. 绿色模块化设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(11):149-154.
TANG Tao, LIU Zhifeng, LIU Guangfu, et al. Research on the Methodology of Green Modular Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(11):149-154.
- [6] SAKUNDARINI N, TAHA Z, GHAZILLA R, et al. A Methodology for Optimizing Modular Design Considering Product End of Life Strategies[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(11):2359-2367.
- [7] SONEGO M, MÁRCIA E S E, DEBARBA H G. The Role of Modularity in Sustainable Design: a Systematic Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176(1):196-209.
- [8] 顾新建, 杨青海. 产品模块化是中国成为制造强国的必由之路[J]. 中国机械工程, 2018, 29(9):1127-1133.
GU Xinjian, YANG Qinghai. Product Modularization Is the Only Way for China to Become a Manufacturing Power[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(9):1127-1133.
- [9] CHENG X, XIAO R, WANG H. A Method for Coupling Analysis of Association Modules in Product Family Design[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 29(6):327-352.
- [10] PISANO G. Modular Design Approach as Enabler for Operational Efficiency of Closed Loop Manufacturing Systems[D]. Stockholm:KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [11] BONVOISIN J, HALSTENBERG F, BUCHERT T, et al. A Systematic Literature Review on Product Modular Design[J]. Journal of Engineering De-

- sign, 2016, 27(7):488-514.
- [12] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:1.
XU Binshi. The Theory and Technology of Equipment Remanufacturing Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:1.
- [13] 王庆峰, 高金吉, 李中, 等. 机电设备在役再制造工程理论研究及应用[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22):1-7.
WANG Qingfeng, GAO Jinji, LI Zhong, et al. Research and Application of Electromechanical Equipment Remanufacturing Engineering in Service Theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22):1-7.
- [14] MA J, KREMER G E O. A Systematic Literature Review of Modular Product Design (MPD) from the Perspective of Sustainability[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(3):1509-1539.
- [15] 郭万林. 机械产品全生命周期设计[J]. 中国机械工程, 2002, 13(13):1153-1158.
GUO Wanglin. The Total Lifecycle Design of Engineering Products[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(13):1153-1158.
- [16] 吕利勇, 乔立红, 王田苗. 面向产品生命周期的产品模块化分解方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4):546-551.
LYU Liyong, QIAO Lihong, WANG Tianmiao. Research on Product Modularity Method for Product Life Cycle[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(4):546-551.
- [17] 田夏. 基于种群遗传算法的产品全生命周期模块化设计方法[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
TIAN Xia. Product Modularity for Life Cycle Design Using Group Genetic Algorithm[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [18] 郭卫, 刘光复, 张雷. 面向全生命周期的产品绿色模块划分方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(10):1441-1445.
GUO Wei, LIU Guangfu, ZHANG Lei. Research on Product's Green Module Partition for Whole Life Cycle[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2010, 33(10):1441-1445.
- [19] 苏铭, 陈蔚芳. 面向客户的全生命周期机床模块划分方法[J]. 中国制造业信息化, 2010, 39(1):49-52.
SU Ming, CHEN Weifang. The Machine Module Partition Method for the Client and Life Cycle[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2010, 39(1):49-52.
- [20] 陈兵, 刘昌, 莫威, 等. 基于层次分析法的清障救援车模块划分技术研究[J]. 制造技术与机床, 2018(4):163-170.
CHEN Bing, LIU Chang, MO Wei, et al. Research on Module of Wrecking and Rescuing Vehicle Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2018(4):163-170.
- [21] GU P, SOSALE S. Product Modularization for Life Cycle Engineering[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(5):387-401.
- [22] GERSHENSON J K, PRASAD G J, ALLAMNE-NI S. Modular Product Design: a Life-cycle View [J]. Journal of Integrated Design & Process Science, 1999, 3(4):13-26.
- [23] UMEDA Y, FUKUSHIGE S, TONOIKE K, et al. Product Modularity for Life Cycle Design[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1):13-16.
- [24] YU S, YANG Q, TAO J. Product Modular Design Incorporating Life Cycle Issues-group Genetic Algorithm (GGA) Based Method[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(9/10):1016-1032.
- [25] YAN J, FENG C. Erratum to: Sustainable Design-oriented Product Modularity Combined with 6R Concept: a Case Study of Rotor Laboratory Bench[J]. Clean Technologies & Environmental Policy, 2014, 16(1):95-109.
- [26] JI Y J, CHEN X B, QI G N, et al. Modular Design Involving Effectiveness of Multiple Phases for Product Life Cycle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 66(9/12):1475-1488.
- [27] 李方义, 刘钢, 汪劲松, 等. 模糊 AHP 方法在产品绿色模块化设计中的应用[J]. 中国机械工程, 2000, 11(9):997-1000.
LI Fangyi, LIU Gang, WANG Jingsong, et al. A Study on Fuzzy AHP Method in Green Modularity Design[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(9):997-1000.
- [28] 张雷, 黄海鸿, 刘光复, 等. 面向绿色设计的产品族规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2):220-227.
ZHANG Lei, HUANG Haihong, LIU Guangfu, et al. Green Design Oriented Product Family Planning [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(2):220-227.
- [29] 鲍宏, 刘光复, 张雷, 等. 面向多样性和绿色性需求满意的产品配置设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(7):815-822.
BAO Hong, LIU Guangfu, ZHANG Lei, et al. Product Configuration Design Oriented to Satisfaction for Diversity and Green Requirements[J]. China Me-

- chanical Engineering, 2012, 23(7):815-822.
- [30] 吴永明, 侯亮, 赖荣荣. 一种面向产品族设计的模块动态规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(7):1456-1462.
- WU Yongming, HOU Liang, LAI Rongshen. Dynamic Planning of Module for Product Family Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(7):1456-1462.
- [31] TSENG H, CHANG C, LI J. Modular Design to Support Green Life-cycle Engineering[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(4):2524-2537.
- [32] SMITH S, YEN C. Green Product Design through Product Modularization Using Atomic Theory[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2010, 26(6): 790-798.
- [33] JI Y, JIAO R J, CHEN L, et al. Green Modular Design for Material Efficiency: a Leader-follower Joint Optimization Model[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 41(2):187-201.
- [34] YANG Q, YU S, SEKHARIA. A Modular Eco-design Method for Life Cycle Engineering Based on Redesign Risk Control[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(9/12):1215-1233.
- [35] CHANG T R, WANG C S, WANG C C. A Systematic Approach for Green Design in Modular Product Development[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9/12):2729-2741.
- [36] 李中凯, 千红涛. 环境意识模块化产品体系结构的设计优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(1):166-174.
- LI Zhongkai, QIAN Hongtao. A Method for Environmental Conscious Modular Product Architecture Design Optimization[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphic, 2015, 27(1): 166-174.
- [37] 魏巍, 许少鹏, 梁赫. 基于环境资源因子的产品平台模块划分方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(2):335-344.
- WEI Wei, XU Shaopeng, LIANG He. Product Platform Module Partition Method Based on the Environmental Resources Factor[J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2016, 28(2):335-344.
- [38] LI J, ZHANG H C, GONZALEZ M A, et al. A Multi-objective Fuzzy Graph Approach for Modular Formulation Considering End-of-life Issues[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(14):4011-4033.
- [39] QIAN X, ZHANG H. Design for Environment: an Environmentally Conscious Analysis Model for Modular Design[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2009, 32(3): 164-175.
- [40] SHENG Z, LI Y, WU L, et al. Lifecycle-oriented Product Modular Design of CNC Machine Tools [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 231(11):1989-1996.
- [41] KOBAYASHI M, MATSUMOTO Y, HIGASHI M. Optimal Design of Modular Configuration Considering a Product Hierarchical Function Structure for Design for Environment[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2013, 79(807):4047-4060.
- [42] YOU Z H, SMITHS. A Multi-objective Modular Design Method for Creating Highly Distinct Independent Modules[J]. Research in Engineering Design, 2016, 27(2):179-191.
- [43] 朱胜, 姚巨坤. 再制造设计理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- ZHU Sheng, YAO Jukun. Design Theories and Applications of Remanufacturing[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [44] 杨继荣, 段广洪, 向东. 面向再制造工程的绿色模块化设计方法研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(增刊1):67-70.
- YANG Jirong, DUAN Guanghong, XIANG Dong. The Research on the Method of the Green Modular Design for Remanufacture Engineering[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(S1):67-70.
- [45] 刘涛, 刘光复, 宋守许, 等. 面向主动再制造的产品模块化设计方法[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10):1180-1187.
- LIU Tao, LIU Guangfu, SONG Shouxu, et al. Products Modular Design Method for the Active Remanufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(10):1180-1187.
- [46] 杨勤, 彭敏, 肖钦兰. 基于再制造的电取暖炉模块化设计[J]. 机械设计, 2014, 31(1):101-105.
- YANG Qin, PENG Min, XIAO Qinlan. Modularization Design of Electric Heater Based on Remanufacturing[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(1):101-105.
- [47] 王蕾, 夏绪辉, 熊颖清, 等. 再制造服务资源模块化方法及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9):2204-2216.
- WANG Lei, XIA Xuhui, XIONG Yingqing, et al. Modular Method of Remanufacturing Service Resources[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(9):2204-2216.

- [48] 刘志,李帮义,程晋石,等.基于模块化设计的制造/再制造生产决策[J].计算机集成制造系统,2016,22(4):935-944.
LIU Zhi, LI Bangyi, CHENG Jinshi, et al. Production Decision of Manufacturing/Remanufacturing Based on Modularity Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(4): 935-944.
- [49] TCHERTCHIAN N, MILLET D, PIALOT O. Modular Grouping Exploration to Design Remanufacturable Products[C]//Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Braunschweig, 2011:413-418.
- [50] ALLWOOD J M, ASHBY M F, GUTOWSKI T G, et al. Material Efficiency: a White Paper[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(3): 362-381.
- [51] TCHERTCHIAN N, MILLET D, PIALOT O. Modifying Module Boundaries to Design Remanufacturable Products; the Modular Grouping Explorer Tool[J]. Journal of Engineering Design, 2013, 24(8):546-574.
- [52] CHENG Q, GUO Y, LIU Z, et al. A New Modularization Method of Heavy-duty Machine Tool for Green Remanufacturing[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(23): 4237-4254.
- [53] 潘晓勇,骆祥峰,刘光复,等.基于层次概率模糊认知图的产品拆卸序列研究[J].机械工程学报,2003,39(4):6-10.
PAN Xiaoyong, LUO Xiangfeng, LIU Guangfu, et al. Research on Disassembly Sequence of Products Based on Hierarchical Probabilistic Fuzzy Cognitive Map[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(4):6-10.
- [54] 钟艳如,黄保群,黄美发,等.基于模块化设计的混合图拆卸建模研究[J].工程设计学报,2006,13(1):31-35.
ZHONG Yanru, HUANG Baoqun, HUANG Meifa, et al. Disassembly Hybrid Graph Model Based on Modular Design[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 13(1):31-35.
- [55] 郭伟祥,刘志峰,刘光复,等.基于模块化思想的拆卸序列规划[J].计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(3):498-504.
GUO Weixiang, LIU Zhifeng, LIU Guangfu, et al. Disassembly Sequence Planning Based on Modularization[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(3):498-504.
- [56] 李名.面向拆卸的产品模块化设计方法研究[D].武汉:武汉大学,2015.
LI Ming. Disassembly Oriented Product Modular Design Method Research[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [57] 魏巍,彭关伟,吉军,等.基于改进免疫算法的可拆卸设计的产品模块划分方法[J].航空制造技术,2017,527(8):64-69.
WEI Wei, PENG Guanwei, JI Jun, et al. A Product Module Partition Method Based on Improved Immune Algorithm[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 527(8):64-69.
- [58] KOBAYASHI M, MATSUMOTO Y, HIGASHI M. Optimal Design of Modular Configuration Considering Hierarchy of a Product Functional Structure[C]//Proceeding of the 12th International Design Conference. Dubrovnik, 2012:1101.
- [59] SMITH S, HUNG P Y. A Parallel Disassembly Method for Green Product Design[C]//Electronics Goes Green Conference. Berlin, 2012 :1-6.
- [60] HUANG C C, LIANG W Y, CHUANG H F, et al. A Novel Approach to Product Modularity and Product Disassembly with the Consideration of 3R-abilities[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1):96-107.
- [61] WANG P, LIU Y, ONG S K, et al. Modular Design of Machine Tools to Facilitate Design for Disassembly and Remanufacturing[J]. Procedia CIRP, 2014, 15:443-448.
- [62] 李婷婷,龚京忠,李国喜,等.可维修性驱动的模块划分[J].机械设计与制造,2007(2):166-168.
LI Tingting, GONG Jingzhong, LI Guoxi, et al. Research on Module Identifying Technology Driven by Maintainability[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(2):166-168.
- [63] 李超,王瑛,汪晓程,等.基于模块化理论的机务准备流程优化研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2011,12(1):83-86.
LI Chao, WANG Ying, WANG Xiaocheng, et al. Study of Process Optimization of Flight Line Maintenance Based on Modular Theory[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2011, 12(1):83-86.
- [64] 程松,钱希森,李龙,等.基于底层模块化的通信开关电源可维修性建模分析[J].通信电源技术,2013,30(6):4-7.
CHENG Song, QIAN Xisen, LI Long, et al. The Maintainability Modeling Analysis of the Communication Switching Mode Power Supply Based on Bottom Modularization[J]. Telecom Power Technology, 2013, 30(6):4-7.
- [65] 郑维强,冯毅雄,谭建荣,等.面向维修的复杂装

- 备模块智能聚类与优化求解技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11):2459-2469.
- JIA Weiqiang, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. Intelligent Clustering and Optimal Solving Technology for Complex Equipment Modules Oriented to Maintenance Properties[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11):2459-2469.
- [66] 陈思益. 面向维修的地铁转向架模块划分技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- CHEN Siyi. Research on Metro Bogies Module Division Technology for Maintenance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [67] TSAI Y T, WANG K S, LO S P. A Study of Modularity Operation of Systems Based on Maintenance Consideration[J]. Journal of Engineering Design, 2003, 14(1):41-56.
- [68] JOO S J. Scheduling Preventive Maintenance for Modular Designed Components: a Dynamic Approach[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 192(2):512-520.
- [69] GOSWAMI M, TIWARI M K. A Predictive Risk Evaluation Framework for Modular Product Concept Selection in New Product Design Environment[J]. Journal of Engineering Design, 2014, 25(1/3):150-171.
- [70] GAO Y, FENG Y, TAN J. Product Modular Design Incorporating Preventive Maintenance Issues [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2):1-15.
- [71] ZHENG H, FENG Y, TAN J, et al. An Integrated Modular Design Methodology Based on Maintenance Performance Consideration[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(2):313-328.
- [72] 黄海鸿, 刘志峰, 王淑旺, 等. 面向回收的产品模块化设计方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12):144-149.
- HUANG Haihong, LIU Zhifeng, WANG Shuwang, et al. Research on Methodology of Modular Design for Recycling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12):144-149.
- [73] 张宠元, 魏巍, 詹洋, 等. 面向主动回收的产品模块化设计方法[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2):42-49.
- ZHANG Chongyuan, WEI Wei, ZHAN Yang, et al. Product Modular Design Method for Active Recovery[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(2):42-49.
- [74] 权妮, 夏绪辉. 面向主动回收的汽车产品模块化设计研究[J]. 物流技术, 2014, 33(5):148-150.
- QUAN Ni, XIA Xuhui. Research on Modular Design of Auto Products for Active Recovery Research[J]. Logistics Technology, 2014, 33(5):148-150.
- [75] 陈铭. 面向材料效率的汽车产品回收利用关键技术研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(21):2615-2625.
- CHEN Ming. Automotive Product Recycling: Material Efficiency and Key Technologies[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(21):2615-2625.
- [76] MOK H S, CHO J R. Development of Product Design Methodology for Assemblability and Disassemblability Considering Recycling[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2001, 18(7):72-84.
- [77] TSENG H. A Systematic Assessment for Modular Product Design: a Design for End-of-life Perspective[C]// The Third International Conference on Operations and Supply Chain Management. Wuhan, 2009:98-105.
- [78] YAMADA T, HASEGAWA S, KINOSHITAY, et al. Process Integration Concept for Waste Reduction among Manufacturing Planning, Modularization and Validation[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 21:337-344.
- [79] BADURDEEN F, AYDIN R, BROWNA J. A Multiple Lifecycle-based Approach to Sustainable Product Configuration Design[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200(1):756-769.
- [80] 支军, 魏少军, 陈弘毅. 用于设计再利用的信头差错控制模块组[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(1):56-59.
- ZHI Jun, WEI Shaojun, CHEN Hongyi. Header Error Control Functional Blocks for Design Reuse [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(1):56-59.
- [81] 曹华军, 张璐璐, 杜彦斌, 等. 面向资源重用的再制造定制设计关系优化配置模型及应用[J]. 机械设计, 2010, 27(5):77-81.
- CAO Huajun, ZHANG Lulu, DU Yanbin, et al. Customized Design Relationship Optimal Configure Model and Application of the Resource Reuse Oriented Re-fabrication[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(5):77-81.
- [82] 张雷, 彭宏伟, 刘志峰, 等. 绿色产品概念设计中的知识重用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7):72-79.
- ZHANG Lei, PENG Hongwei, LIU Zhifeng, et al. The Knowledge Reuse in the Concept of Green Product Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7):72-79.

- [83] 湛炎辉. 复杂机电产品模块化设计若干关键技术及应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
CHEN Yanhui. Research on Several Key Technologies and Applications of Modular Design for Complex Mechantronc Product[D]. Xi'an:Xidian University, 2013.
- [84] 徐婧欣. 模块化设计在零料再利用设计中应用的研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2016.
XU Jingxin. Research on the Application of Modular Design in the Design of Zero Material Reuse [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016.
- [85] 侯昆峰, 李中凯. 面向绿色模块化的产品重设计方法[J]. 现代制造工程, 2017(12):139-145.
HOU Kunfeng, LI Zhongkai. A Product Redesign Methodology for Green Modularization[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(12):139-145.
- [86] KIMURA F, KATO S, HATA T, et al. Product Modularization for Parts Reuse in Inverse Manufacturing[J]. Annals of the CIRP, 2001, 50(1): 89-92.
- [87] WATANABE M, TAKATA S. Module-based Model Change Planning in Consideration of Environmental Impact and Customer Satisfaction[C]// Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Tokyo, 2005:9045626.
- [88] MEEHAN J S, DUFFY A H B, WHITFIELD R I. Supporting Design for Re-use' with Modular Design[J]. Concurrent Engineering: Research and Applications, 2007, 15(2):141-155.
- [89] YANG Q, SUIRAN Y U, JIANG D. A Modular Method of Developing an Eco-product Family Considering the Reusability and Recyclability of Customer Products[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 64(2):254-265.
- [90] 高一聪, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 面向寿命终结阶段的机械产品设计绿色多准则优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23):144-151.
GAO Yicong, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. Dynamic Characteristics of Multi-stage Planetary Gears of Shield Tunneling Machine Based on Planet Mesh Phasing Analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23):144-151.
- [91] 陈小斌. 机电产品绿色模块划分方法研究与应用[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
CEHN Xiaobin. Research and Application of Green Module Partition for Electromechanical Products [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [92] 孟凯, 楼佩煌, 钱晓明, 等. 多产品再生模块组合与寿命终期方案的同步优选[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(2):556-570.
MENG Kai, LOU Peihuang, QIAN Xiaoming, et al. Simultaneous Optimal Selection of Recovery Module Portfolio and End-of-life Option for Multiple Products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(2):556-570.
- [93] 张付英, 段晶莹, 宋娜娜, 等. 面向产品可持续设计的模块化划分方法[J]. 包装工程, 2017, 38(19):142-147.
ZHANG Fuying, DUAN Jingying, SONG Nana, et al. Modular Division Method for Sustainable Design of Products[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19):142-147.
- [94] XING K, BELUSKO M, LUONG L, et al. An Evaluation Model of Product Upgradeability for Remanufacture[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(1/2): 1-14.
- [95] SELIGER G, ZETTL M. Modularization as an Enabler for Cycle Economy[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1):133-136.
- [96] MA J, KREMER G E O. A Sustainable Modular Product Design Approach with Key Components and Uncertain End-of-life Strategy Consideration [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1/4):741-763.
- [97] FADEYI J A, MONPLAISIR L, AGUWA C. The Integration of Core Cleaning and Product Serviceability into Product Modularization for the Creation of an Improved Remanufacturing-product Service System[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159(15):446-455.
- [98] MUTINGI M, DUBE P, MBOHWA C. A Modular Product Design Approach for Sustainable Manufacturing in a Fuzzy Environment[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8:471-478.
- [99] KIM S, MOON S K. Eco-modular Product Architecture Identification and Assessment for Product Recovery[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(1):383-403.
- [100] MESA J A, ESPARRAGOZA I, MAURY H. Modular Architecture Principles-MAPs: a Key Factor in the Development of Sustainable Open Architecture Products[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2020, 13(2):108-122.

(编辑 王艳丽)

作者简介:程贤福,男,1975 年出生,博士、教授。研究方向为模块化设计、绿色再制造、大批量定制等。出版专著 2 部,发表论文 100 篇。E-mail:chxf_xn@sina.com。