

【特别策划】

## 创新设计中的源泉、机制和评价问题研究综述

胡洁, 陈斌

(上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** **目的** 研究创新设计中创新源泉、创新机制和评价机制的理论研究与实践应用。**方法** 通过研究并分析国内外相关文献, 总结归纳创新设计中的多学科知识建模、需求驱动和知识激励的设计方法, 以及设计的主观与客观评价体系, 分析创新设计研究领域将发生的变革和未来发展的趋势。**结论** 系统探讨了在面对复杂设计任务时, 创新设计对多学科知识的需求, 提出创新设计不仅需要重用本领域的设计知识, 而且需要跨领域的多学科知识的激励, 是一种由需求驱动的多学科知识激励过程, 不仅需要内在的显性、隐性需求的驱动, 而且需要外在的多学科知识的激励。针对当下的创新设计理论和实践研究, 提出创新设计需要主观与客观的综合评价, 不仅需要满足上游的设计需求, 而且需要满足下游的性能要求。研究表明, 多学科领域内丰富的设计知识将为设计过程提供创新源泉和核心驱动力, 将有力支撑创新设计应对更加复杂、更加多变的设计任务需求。

**关键词:** 创新设计; 创新源泉; 创新机制; 评价机制; 多学科知识; 知识激励; 主客观评价

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)18-0060-11

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.18.008

### Source, Operating Mechanism, and Evaluation of Innovative Design

HU Jie, CHEN Bin

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the theoretical research and practical application of innovative design's source, operating mechanism, and evaluation. Through the research on related literature at home and abroad and the analysis on practical application of multi-disciplinary knowledge modelling, requirement-driven and knowledge-stimulated design, and subjective and objective design evaluation, the typical research directions were summarized and the change and development of innovative design were analyzed. Innovative design's requirement for multi-disciplinary design knowledge in complex design is discussed systematically. It is pointed out that innovative design needs not only the reuse of design knowledge in the corresponding field, but also the stimulation of interdisciplinary knowledge. It is a requirement-driven and multi-disciplinary-knowledge-stimulated process which needs not only internal manifest and potential need-driven, but also external multi-disciplinary-knowledge-stimulation. According to relevant researches on innovative design theory and practice, it is proposed that innovative design needs both subjective evaluation from upstream design requirement and objective evaluation from downstream performance limitation. These abundant researches show that the rich multi-disciplinary design knowledge can strongly support the innovative design to deal with more complicated and changeable design tasks.

**KEY WORDS:** innovative design; resource; operating mechanism; evaluation; multi-disciplinary knowledge; knowledge stimulation; subjective and objective evaluation

收稿日期: 2020-04-25

基金项目: 国家社科基金重大项目(17ZDA020); 科技部创新方法工作专项(2018M020100); 国家自然科学基金(51775332)

作者简介: 胡洁(1973—), 男, 安徽人, 博士, 上海交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能设计、创新设计、设计形态学。

创新驱动是世界大势所趋。全球新一轮科技革命、产业变革和军事变革加速演进,颠覆性技术不断涌现,创新驱动成为许多国家谋求竞争优势的核心战略。创新的源头在设计,随着时代的进步,设计需求日益复杂多变,仅依靠单一学科的设计知识已经无法支撑创新设计的需要,设计师需要综合考虑跨学科的多领域设计知识。一方面,从内部依靠设计需求驱动创新设计,另一方面,从外部依靠多学科设计知识为创新设计提供合适的激励环境。与此同时,创新设计的整个行进流程还需要进行评价把控,不仅需要考虑上游的客户主观要求,而且需要考虑下游的性能客观要求。因此,创新设计的关键问题主要体现在源泉、机制和评价三个方面。近年来,国内外已有一些学者和研究机构从事创新设计中多学科的知识建模、需求驱动与知识激励的设计、设计的主观与客观评价等方面的研究工作,取得了一定的进展。本文按照创新设计的源泉、创新设计的机制和创新设计的评价这三个方面,对这些研究进行整理和分析。

## 1 创新设计的源泉

### 1.1 设计知识的表达和建模

创新设计的源泉在于设计知识,而合适的设计知识表达和建模方法是提升设计知识提取、重用、创新效率的关键。Gero 和 Kannengiesser 对大量设计行为进行了考察,通过对海量数据的普适化总结,提出了一种基本的设计知识表达模型,包括三种类型的设计知识,即功能知识、行为知识和结构知识<sup>[1]</sup>。Pahl 和 Beitz 通过经验主义的方法对整个设计流程进行了概括和建模,其模型系统地将创新设计描述为四个步骤,即明确任务、概念设计、具体设计和详细设计,而设计知识就是这四个步骤中作为操作标靶的对象<sup>[2]</sup>。Suh<sup>[3]</sup>提出的公理化设计理论模型则认为,设计知识被包含在四个域之中,即需求域、功能域、物理域和过程域,而整个设计过程就是这些设计知识在这四个域之间反复映射的过程。

在上述的三个创新设计模型中,创新的概念成分大多集中出现在设计的初始阶段,即概念设计阶段。因此,这一阶段的设计知识建模对于创新设计的成败来说尤为关键,吸引了很多学者进一步探究其中的设计知识建模问题。Sun 等人<sup>[4]</sup>提出了一种涵盖多层次工程设计过程的设计知识模型,集成了用户和产品的行为数据,用于帮助设计师在产品过程中充分考虑设计约束和功能需求,从而实现产品性能最优化。据称,这种基于行为的设计知识模型可以被应用于工业工程设计,包括普通的产品设计和人机工程设计。Cao 等人<sup>[5]</sup>构建了一种基于代理的机械产品设计模型,首先通过分析机械产品的设计需求得到功能参数和设计变量,而后在键合图基本元素的基础上构建相

应的行为矩阵模型,作为设计任务的特异性知识表达。他们还建立了一个基于代理的框架,用于解算提出的行为矩阵模型,以实现从产品功能方法树到原理解集合之间的映射,同时,他们还使用了代理技术实现了进一步的方案评价和优化。Haluk 和 Kim 利用大量文本数据语料库对深度神经网络进行了训练,从而使其能够将由自然语言描述的设计知识映射到分布向量表达空间当中,成为计算机能够识别和处理的数据结构,并用其分割设计早期阶段中的功能域和物理域,提取关键功能需求<sup>[6]</sup>。Kota 和 Chiou 充分利用了矩阵表达机械产品中机构运动的优势,从数学模型的角度提出了一种基于量化矩阵表达方法的机构运动单元知识建模方法<sup>[7]</sup>。Liu 等人<sup>[8-9]</sup>则将视角进一步推进到计算机模拟仿真领域,以公理化设计理论中从功能域到物理域之间的映射模式为基础,构建了一种设计知识的计算机仿真建模方法,这种基于公理化设计模型的设计知识模型能够更好地完成概念设计阶段的知识描述。Cochran 等人<sup>[10]</sup>对产品全生命周期进行了分段整理和分析,利用公理化设计模型对各个阶段中的设计知识进行提取和建模实践。Giovannini 等人<sup>[11]</sup>详细分析了设计过程中的知识表达,指出知识表达方法所引发的歧义性是导致设计域之间映射失败的关键,而这些歧义性主要是由知识表达方法构建时所采用的形式逻辑构造带来的。基于这一论断,他们提出了一种反逻辑构造,即通过一种无逻辑的智能行为来构建设计知识的表达,并在 CAD 系统上进行了实例化验证。Christophe 等人<sup>[12]</sup>利用一种图形化的表达语言——SysML 语言,开发了一种基于知识表达的概念设计模型。Yang 等人<sup>[13]</sup>利用“设计对象本体—设计过程本体—数据资源”三层结构构建了一种设计知识表达系统,其语义描述框架的定义基于推荐上层合并本体 (Suggested Upper Merged Ontology),以此实现基于本体网络语言 (Ontology Web Language) 的本体协同构建。他们基于这种设计知识本体模型,改进了设计知识的存储结构,提升了模型的泛化性能,并在自行火炮的设计案例中验证了这种模型的可行性。此外, Jaskowicz 和 Neville 提出了一种用于描述固定轴机构行为的结构化语言,并将其用于支持机构的设计知识综合<sup>[14]</sup>。

这些研究关注整个创新设计中各个阶段之间的相互关联,以及其在逻辑和抽象层面上的普遍特征,从而可以从各个层面的设计知识当中总结出共同点,构建出具有普适性的设计知识表达和建模方法,这也为多学科领域设计知识的融合提供了方法学上的基础。

### 1.2 多学科知识对创新设计的激励

创新设计由于其任务对象复杂性越来越高,所以单一学科领域的设计知识已无法满足其创新需求,跨

学科、多领域知识激励下的创新设计已成为研究热点。随着研究的深入,创新设计的源泉将不仅仅构建于某个单一的学科领域的知识模型之上,而是扩展到多学科领域协同的知识模型之上。Na 等人<sup>[15]</sup>使用统一的语言方程来表达高强度钢板卷曲成形装备的多学科设计知识,从而得到卷曲角加速度、卷曲散热指数和卷曲应变强度等系统核心设计参数的数学表达,用以建立起整个卷曲成形装备的动力学模型、热力学模型和应力应变模型。苏明顺等人<sup>[16]</sup>利用三维工程建模工具对复杂机电产品进行虚拟样机建模,并通过这种虚拟样机建模的手段,获取复杂机电产品的多学科设计参数,进而使用多目标优化算法对生物质复杂成形设备这种复杂机电产品中的液压系统和成形压杆机构的设计参数进行了多学科耦合优化。方伟光等人<sup>[17]</sup>针对复杂工程产品设计过程中由多学科交叉、知识资源数量庞大导致的知识重用与共享困难等问题,提出了以学科领域维度划分为依据的设计知识表示方法,以学科领域本体为语义模型,实现设计知识结构化、维度化的表示和建模。周建慧等人<sup>[18]</sup>分析了超大本体和顶层本体在创新设计过程中工程知识管理方面的缺点,从而针对性地提出了动态化本体,并给出了其构建方法和评价指标。殷学梅等人<sup>[19]</sup>提出了产品设计“一元三层”的数据模型,采用多维、多粒度的数据建模和本体描述方法完成了对复杂产品多学科设计知识的表达和建模。

除了挖掘设计者已有的设计知识之外,创新设计知识建模研究的另一方向就是针对复杂设计对象设计过程的知识识别研究,也就是理解并获取设计过程中的设计知识。在产品创新设计领域中,一些学者已实现从网络<sup>[20]</sup>、自然语言<sup>[21]</sup>、文本<sup>[22]</sup>等媒介中获取相关的设计规则、工艺参数<sup>[23]</sup>等设计知识。一些学者从如何准确并完整获取经验性知识的方面入手,研究设计知识的获取,一方面从管理学<sup>[24]</sup>角度,通过设计咨询问卷获取;另一方面引入人工智能技术,如数字孪生<sup>[25]</sup>、深度学习<sup>[26]</sup>,通过构建网络模型获取,例如 Zou 等人<sup>[27]</sup>利用支持向量机处理微通道精密成形装备运行过程中的统计学数据,从中提取出用于这种复杂产品创新设计的统计学参数特征等设计知识。此外,也有学者尝试在设计过程中的知识获取与建模中融合认知科学。Lake 等人<sup>[28]</sup>对创新设计过程中的人类认知行为进行了深入分析,指出人类能够通过少量实例的学习进行归纳。Busemeyer<sup>[29]</sup>对认知心理学、决策理论和行为决策在创新设计中的相互之间的作用和影响进行了分析,提出了创新设计过程中设计者认知过程模型。Liang 等人<sup>[30]</sup>基于物理符号系统假设和联结主义,提出了一种元认知模型,用于对工程产品设计师的设计认知过程进行描述、主动监测和后续监管。通过这种模型,可以从认知科学的角度分析设计师在产品创新设计过程中的认知活动。他们利用这一模

型,成功得出经验丰富的设计师和新手设计师在燃油喷射泵设计过程中的认知差异,并对其进行了详细比较和分析。在多学科的设计知识获取和建模方法的研究过程中,研究者侧重于基于本体、Petri 网等设计知识的建模方法,以此实现跨领域的设计知识一致性建模。

## 2 创新设计的机制

创新设计的过程实质上是需求驱动的,综合考虑多学科设计知识的正向设计过程,其运行机制方面的研究大致可分为内在的需求驱动的创新设计和外在的知识激励的创新设计。

### 2.1 需求驱动的创新设计

对于创新设计而言,用户的需求始终是设计师需要首先考虑的问题,因此基于需求的创新设计便成为产品设计过程中一种重要的创新机制,学者们针对需求驱动的创新设计也开展了丰富的研究工作。荆洪英等人<sup>[31]</sup>融合了用户需求获取环节中的用户需求来源划分和用户需求获取这两个关键的任务,以及用户需求分析环节中的用户需求结构建立和用户需求信息评价这两个必要任务,建立了面向复杂机电产品的用户需求获取与分析集成模型。Moon 等人<sup>[32]</sup>分析了客户需求行为对于正向设计过程中创新工作的影响,并指出客户需求对于在正向设计过程中有效催生创新灵感的重要意义。Chen 等人<sup>[33]</sup>归纳了用户需求的类型,并从管理学角度重点分析了用户隐性需求的类型及处理方法,为获取用户隐性需求奠定了基础。Liu 等人<sup>[34]</sup>重点针对可持续性需求进行了分析,提出了相关的用户需求理解和评价方法。沈铭瑜等人<sup>[35]</sup>利用商空间理论对产品的整体形态构成进行了分析和解构,从中获取了设计需求和产品物理形态之间的共性化特征,并以此建立了一种从需求到形态的逐级推导过程。这些需求驱动的创新设计思路和实践对于提升产品设计创意的质量有着很好的促进作用,可以让设计师更为明确地遵循着客户的需求,完成整套复杂的设计过程,同时也能在其中不断地纠正设计过程中走过的弯路。

需求驱动创新设计的代表性创新设计方法有公理化设计方法和 TRIZ 设计方法等。

1) 公理化设计方法将设计过程分解为四个域,即用户域、功能域、物理域及过程域。设计人员的主要工作就是在这四个设计域之间进行设计知识的映射,以此来实现设计问题的求解,并通过具有普适性的独立性公理和信息公理对求解过程进行质量把控。Kumar 和 Tandon 将需求过程理论引入公理化设计的用户域,实现了公理化设计中的用户域建模<sup>[36]</sup>。Farid 和 Ribeiro 利用公理化设计方法实现了分布式可重构复杂机电产品的创新设计<sup>[37]</sup>。Tokunaga 和 Fujimura

研究了融合设计结构矩阵和公理化设计的统一模型,证明了面向功能的设计结构矩阵与公理化设计中模块化矩阵的等价关系<sup>[38]</sup>。公理设计理论以设计公理的形式标定了创新设计过程的走向,同时也提供了诸如设计矩阵和域映射模型之类的设计工具,可以很好地指导设计师开展产品的创新设计工作。王昊琪等人<sup>[39]</sup>将德国的系统化设计理论中对设计过程的分段套用到公理化设计的四个设计域之间的映射之上,使设计域之间的映射在时间流程上形成了一个完整的环流。孔建和田莉莉将公理化设计理论引入到挤压铸造成形装备的正向设计和开发当中,综合考虑了挤压铸造成形装备在智能制造方面的功能特征,包含自适应、自组织、自维护、协作和智能检测监控等功能,具有促进和优化挤压铸造成形装备的功能设计的意义和作用<sup>[40]</sup>。文献[41-44]使用公理化设计理论中的基本概念和设计过程,分析了不同的大型复杂装备产品的设计流程,总结了复杂产品设计过程中的功能需求,使用设计矩阵对功能需求和设计参数之间的映射进行了求解。

2) TRIZ 设计方法即“发明问题解决理论方法”,其核心思想是技术进化原理,由矛盾矩阵、四十个发明原理、七十六个标准解及若干分析求解方法和工具构成其主要技术体系,从发明创新的原理角度出发,给出了正向设计过程中创新思维的运行机制,对于复杂产品的创新设计有很好的指导作用。檀润华等人<sup>[45-47]</sup>基于 TRIZ 方法研究了复杂机电系统功能分解、破坏性创新设计、模糊前段驱动的产品创新设计、产品创新概念设计与详细设计集成过程模型,开发了计算机辅助创新系统,并进行了大量的 TRIZ 方法的成功应用。Chereifi 等人<sup>[48]</sup>基于 TRIZ 方法提出了生态创新设计方法,针对生态创新设计中的冲突问题,构建了生态创新参数与工程参数间的对应关系,实现了设计过程中的冲突消解与创新设计。李少波等人<sup>[49]</sup>通过构建产品设计过程中的“功能—结构”映射模型,提取了设计过程中的功能与结构知识,采用 Apriori 算法提取了相应的关联规则,从而获得了“功能—结构”之间的关联知识,用以辅助复杂机电系统的创新设计。张鹏等人<sup>[50]</sup>将 TRIZ 理论的有效完整功能和非有效完整功能,与设计过程复杂性理论(Design-Centric Complexity, 简称 DCC)中重复功能集和组合集建立联系,经过 TRIZ 理论对问题功能进行转化后,以系统的重复功能集、组合集和组合辅助功能集作为复杂机电系统功能分解的结果,从而形成了复杂机电系统的 DCC-TRIZ 集成功能分解过程模型。Li 等人<sup>[51]</sup>分析了复杂注塑成形装备实际生产过程中存在的各种问题,利用 TRIZ 创新方法和理论分析手段判定其中存在的技术冲突,形成了冲突矩阵表,用于解决发明原理当中存在的问题,利用 TRIZ 理论发明原理提供的创意构建了装备中注塑机构、液压系统和

加热融化系统的创新设计方案。Park 等人<sup>[52]</sup>使用 TRIZ 发明原理克服了现有的硫聚物混凝土成形装备的缺陷,并采用概念评分技术对装备结构设计和产品质量评定阶段进行了设计方案的评价,实现了装备的内切模的拓扑优化。

## 2.2 知识激励的设计

知识激励的设计过程即在已有知识的基础上,通过对知识的重组,获得产品的解决方案。代表性的方法有模块化设计、产品族设计、数字化设计等。

### 2.2.1 模块化设计方法

模块化设计方法需要构建于对产品功能的分析基础之上。对于复杂产品而言,其整体功能将被逐级分解、细分,从而得到整个产品的功能体系框架,而后,将对体系中联系紧密的功能进行组合,从而得到功能模块。这些功能模块是拼凑整个产品最终功能的单元,通过不同的连结方式和搭建结构,可以构建出不同的整体功能,也就对应着不同的产品。这种设计方式可以充分利用已有的设计知识,提高知识重用的整体效率。Zhang 等人<sup>[53]</sup>和 Bae 等人<sup>[54]</sup>分别采用模块化设计方法,开发新车型的电控产品,提高了新车型开发效率。Lee 等人<sup>[55]</sup>按照网络分析法的运作条件,对复杂产品中各个模块之间的功能依赖关系进行分析,并将其构建为相应的网络数据结构,之后利用网络分析法提取出产品模块之间的量化依赖指数,并以此作为已有产品模块管理和新模块设计研发的优化指标。朱丽娜<sup>[56]</sup>提出了数控深孔加工机床的模块化,建立了相应的模块化设计生产系统,实现了深孔加工装备生产的个性化、多样化生产,不仅增强了机床可靠性,而且提高了设计生产速度,减少了投入成本,对加快市场反应速度和增强机床可靠性有实际意义。Fang<sup>[57]</sup>将直缝钢管成形装备的各个功能模块和主要结构模块进行了总结,并对每个模块的配置组合进行了汇编。通过对复杂产品的诸多模块的系列化,可以大幅提升其创新设计的效率,简化设计流程,同时也可以允许客户更加清晰和正确地根据他们的具体功能需求选择合适的模块配置。可以看到,模块化设计能够使复杂产品的创新设计过程更加系统化和条理化,既能够节约设计成本,又能够根据市场需求的变化而灵活改变设计进程。

### 2.2.2 产品族设计方法

模块化设计中的创新元素还可以通过产品族获取,其基本思想是以产品平台战略为指导,针对细分市场中不同客户群的需求,进行基于产品平台的相关系列产品设计,以低成本和快速开发周期来满足不同客户的个性化需求。对于复杂产品而言,许多功能模块有时可以通过不同的配置组合在某些特定的基础上,搭建出适合不同工作状态需求的新型产品。

杨黎鹏和李维国提出一种基于“功能—几何相关性—接口”的产品概念设计过程模型,计算设备间功能、几何相关性、接口的权值,并用图分割法为其生成模块划分方案<sup>[58]</sup>。将单项和综合指标评价相结合,对划分方案加以评价,选出最佳模块化方案。邱坤华等人<sup>[59]</sup>针对飞机零件工艺装备结构相似、细节结构变化大的特点,提出了一种基于参数化模块的飞机零件工艺装备变型设计的方法。基于零件的相似性和工艺要求提取飞机零件工装产品族,在产品族内对模块进行划分与组合,实现变型设计。产品族设计的思路有利于基于已有设计经验向新的需求方向快速实现衍生设计,其核心在于已有设计知识、经验、案例的积累、分析、系统化组织和重组创新,其思路已广泛应用于各种重设计方法当中。Nanda 等人<sup>[60]</sup>提出了一种柔性化产品族知识管理框架,使用形式概念分析方法将自然语言描述和参数化描述下的产品族设计信息捕捉并重新组织,最后转化为一种被称为网络化材料清单的网络结构,并使用网络本体语言将其进一步编码为循环标记图结构,帮助设计师跨越不同的产品设计阶段,跨越产品族中的不同产品搜索、查询和综合设计知识。Alizon 等人<sup>[61]</sup>利用设计结构矩阵流、价值分析方法和共性多样性对抗指数构建了一种改善已有产品族设计性能的方法,充分考虑了产品族内部各个不同产品之间设计过程的共性和多样性协调,以此改善产品性能的用户满意度,提升产品族内部结构的模块化和组件化程度。Sa'Ed<sup>[62]</sup>通过分析现有产品的市场供应情况来提取产品的需求和功能信息,并通过颗粒化过程去除其中的冗余信息,从而标定出实现功能需求的物理载体。随后,按照功能学共性对功能载体进行平行分组,以此提取出物理学上异构的产品之间的功能学共性特征,从而实现异构产品族的构建和基于异构产品族的重设计创新。

### 2.2.3 数字化设计方法

在实际的产品设计中,也可以利用数字化的 CAD/CAE (Computer Aided Design/Computer Aided Engineering) 工具进行模块化设计和产品族设计过程中的数据采集、处理、规范化和保存工作。Wang 等人<sup>[63]</sup>将基于 NX 的参数化设计方法引入到高精度模切成型装备的设计当中,以适应复杂装备产品生产企业快速设计的要求。他们使用参数化设计思想对多种类型的复杂模切成型装备进行了分析,实现了复杂模切成型装备中的核心部件、传输系统、步进电机和加压四杆机构的参数化设计。卞正军和袁红兵使用 CAD/CAE 系统 Solidworks 对生化分析仪加样臂进行参数化设计,通过 Solidworks 二次开发,实现了全自动生化分析仪中加样臂三维模型的参数化设计和二维工程图纸的半参数化设计<sup>[64]</sup>。Neugebauer 等人<sup>[65]</sup>将基于知识的设计方法集成应用在锻造成形、管材液压成形,以及钣金件冲压成形工艺过程的设计和相应

的成形装备的设计当中,通过使用一种基于曲率的成形件表面分割方法,将三维 CAD 数据化简为一维的骨架图谱,以此支持处在上层的设计知识归类和析算算法,进而发展出了一种可以自动提取、识别和解释复杂成形特性的系统化设计知识获取方法。

## 3 创新设计的评价

由于实际需求的日益多元化、复杂化,以及设计目标功能和结构复杂性的日益提升,产品创新设计过程中需要一套完整而系统的评价方法,以此判定当前阶段备选设计方案的可行性和优劣性。为了克服传统的人为评价过程中的主观偏见,研究学者提出了一系列的创新设计评价方法以代替主观人工评价。其中,较为常用的是多目标评价方法 (Multi Criteria Decision Making, 简称 MCDM)<sup>[66-67]</sup>和客观量化评价方法。在创新设计的评价方法的研究过程中,多目标评价方法大多侧重于对方法与算法的研究,将设计评价简单等价为一个被动的多目标评价问题,而客观量化评价方法侧重于提高客观评价的精度。

### 3.1 多目标评价方法

Trdin 和 Bohanec 改进了多目标评价方法,并将其引入设计评价当中,实现了对设计方案定性和定量的评价<sup>[68]</sup>。Liu 等人<sup>[69]</sup>和 Wang<sup>[70]</sup>引入了模糊语义技术,研究了在信息不完整情况下的多目标评价方法。Tiwari 等人<sup>[71]</sup>在产品设计方案评价中结合用户模糊需求,从用户角度完成了对设计方案的多目标模糊评价。李洁翎等人<sup>[72]</sup>通过引入全局敏感度分析,确定了多目标评价参数对复杂机电系统运行效果的影响大小,提出了能够缩短正向设计周期的代理模型。很多研究考虑了多个评价专家在多个评价指标共同作用下的综合评价机制,较常用的综合评价方法包括:多目标群决策方法<sup>[73]</sup>、层次分析法 (AHP)<sup>[74]</sup>、层次网络分析法 (ANP)<sup>[75-76]</sup>、灰度分析方法<sup>[77]</sup>、TOPSIS 排序法<sup>[78]</sup>、折衷排序法 (VIKOR)<sup>[79]</sup>、贝叶斯网络<sup>[80]</sup>等。这些评价方法可被应用在复杂产品创新设计过程中的不同阶段当中。Kitayama 等人<sup>[81]</sup>将多目标群决策方法用于塑性注塑成型装备的工艺参数的最优化上,采用径向基函数网络和雷达图完成了注塑成型装备正向设计中的各类权衡分析。Ullah 和 Noor-E-Alam 提出了一种基于模糊逻辑的方法,跨越了大数据和直观图像化信息之间的技术间隙,用于支持复杂产品创新设计中的多目标群决策评价过程<sup>[82]</sup>。Peng 等人<sup>[83]</sup>利用面向对象的设计思路构建了一种机加工成形的特性定义和分类系统,并以此提出了一种基于机加工成形特性和 TOPSIS 方法的切削成形装备设计参数数据库系统。

许多学者在比较了不同的单一评价方法基础后,提出了多种混合多目标设计评价方法,实现不同方法

之间的取长补短。Huseyinov 等人<sup>[84]</sup>分析了 AHP 和 TOPSIS 在产品评价方面的差异,指出在不确定环境下应用 TOPSIS 方法比 AHP 方法更为有效。Zyoud 等人<sup>[85]</sup>,以及 Akgün 和 Erdal<sup>[86]</sup>在设计评价中结合 TOPSIS 和 AHP 方法,采用 AHP 获得了评价指标的权重,并利用 TOPSIS 方法综合评价产品。Zhou 等人<sup>[87]</sup>,以及 Fayek 和 Omar<sup>[88]</sup>分别在传统 TOPSIS 中引入灰度理论和模糊理论,实现了信息不完整情况下的多目标评价。Vinodh 等人<sup>[89]</sup>将质量功能展开,集合 TRIZ 和 AHP 以开发环保型汽车零部件。在需求分析的基础上运用质量功能展开和 TRIZ 得出了一系列产品创新设计方案,并用 AHP 对方案进行优选,得出最佳方案。Morente-Molinera 等人<sup>[90]</sup>针对多目标群决策中无法有效处理大量候选方案和大量目标的情况,通过小样本的分析,并类推到整个候选方案的评价中,从而提高评价的效率。这些混合多目标设计评价方法综合了各种单一评价方法的优点,对于提高复杂装备产品的设计评价效率和质量有着积极的意义。Nguyen 等人<sup>[91]</sup>将模糊语义参考关联信息集成到 AHP 方法当中,用以处理不精确的模糊语义信息。这种工作思路可以简化设计数据的采集过程,从而方便地获得 AHP 的互补对比矩阵,用以决定各个设计参数的权重大小。他们成功地将这种方法应用在复杂切削成形装备的刀具设计和最优化问题之上。Gok<sup>[92]</sup>提出了一种新的切削成形装备最优设计参数的确定方法。他使用模糊 TOPSIS 方法和灰色关联分析法对球墨铸铁的切削成形过程进行了分析,基于切削成形过程中成形件的平均表面粗糙度、最大粗糙度、和主切削力与进给力,建立了切削成形过程的数学模型。Khan 和 Maity 提出了一种耦合了模糊分析的 TOPSIS 方法,用于识别出纯钛切削成形装备的最优设计参数变量组合,并用方差分析法证明了该方法的可行性和应用潜力<sup>[93]</sup>。Yuvaraj 和 Kumar 使用多目标群决策方法和 TOPSIS 方法对多响应特性的磨料水射流切削成形装备的设计参数组合进行了最优化分析<sup>[94]</sup>。

### 3.2 客观量化评价方法

在创新设计的评价过程中,主观评价操作简便,而客观评价方法需要进行复杂的决策计算,因此有必要研究在客观评价过程中结合评价者主观意愿。由于评价者主观意愿是自然语言表达,没有一种结构化解析模式,所以研究者们引入模糊集的方法用于自然语言的解构和颗粒化,从而能够从中提取意义单元和量化指标,典型的模糊集客观量化方法包括模糊 AHP<sup>[95]</sup>、模糊 ANP<sup>[96]</sup>、模糊 TOPSIS<sup>[97]</sup>、模糊折衷排序方法(VIKOR)<sup>[98]</sup>等。这些方法经过多年不断的发展,逐步衍生出了很多分支,被广泛应用于各类实际场景中。Singh 等人<sup>[99]</sup>在可持续式产品制造和生产中集成了区间 AHP 和区间 VIKOR 方法,实现了产品

的选择。

这些主观评价的客观量化方法可以很好地将设计师和客户这些不同主体的主观评价纳入到系统而规范的数字化评价体系当中,从而能够更好地帮助设计师优选和改进设计方案的。Patel 和 Maniya 提出了一种综合 AHP 方法和基于比值分析的多目标优化方法的主观设计评价系统,用于确定线切割放电成形装备的最优设计参数组合<sup>[100]</sup>。Ray<sup>[101]</sup>针对大型切削成形装备的切削液配方设计问题,使用 AHP 方法计算各种切削液特性影响的主观评价权重,使用 VIKOR 方法计算各个备选配方设计方案的优劣等级,最终获得了包含设计师和顾客主观评价信息的最优切削液配方设计方案。Li 等人<sup>[102]</sup>提出了一种由主观评价和客观评价共同构成的折衷权重评价方法,并将其用于完成铝硅合金活塞切削成形装备正向设计中的刀具选择和优化问题。其中刀具材料特性的主观评价指标由 AHP 方法得到,而其客观评价指标则由熵权重法得到。Cebi 等人<sup>[103]</sup>集成了包括模糊分析、AHP、公理设计理论中的信息公理,以及基于最优解相似度的功能表现评价技术等一系列设计方案评价方法,并将其应用在船体大尺寸钣金件成形加工装备的切割和冲压设计参数的最优化问题之上。Khan 和 Maity 在磨削成形加工装备开发中引入模糊 TOPSIS 方法,以减少表秒切削粗糙度、切削应力为目标,获得了最优的设备设计参数方案<sup>[104]</sup>。

## 4 存在问题和未来趋势

创新设计是内在需求驱动和外任知识激励的正向设计过程。一方面,需要综合考虑用户的显性需求和隐性需求,是一个内在需求驱动的设计过程,即从需求到功能再到结构的映射过程;另一方面,需要综合考虑多领域、多学科设计知识,是一个外在知识激励的设计过程。目前,基于知识的设计理论与方法可以很好地支持设计过程中的知识重用。然而,在创新设计的创新源泉、创新机制、评价机制、理论和实践相衔接四个方面仍存在亟待解决的科学问题,需要在未来的设计学研究中进一步解决。

### 4.1 创新源泉方面

从创新源泉的角度,面对日益复杂的设计任务,创新设计需要跨领域的多学科知识支持。创新设计过程不仅需要重用本领域的设计知识,而且需要跨领域的多学科知识的激励。然而,设计者在设计过程中往往局限于本领域的专业知识,导致设计很难突破固有的思维定式。实质上,本领域的产品设计及跨领域的产品设计过程都依赖于多学科知识的激励。因此,在未来的设计学研究中,有必要从认知学的角度,研究多学科知识的获取与一致性建模,从而进一步解决创新设计的源泉问题。

## 4.2 创新机制方面

从创新机制的角度,创新设计是需求驱动的多学科知识激励过程。创新设计不仅需要内在的显性、隐性需求驱动,而且需要外在的多学科知识的激励。然而,设计者在设计过程中往往片面地考虑显性需求,缺乏对隐性需求的挖掘,并且忽略了内在需求驱动与外在知识激励的联动。实质上,需求驱动与知识激励相互耦合,贯穿于创新设计的整个过程。因此,在未来的设计学研究中,有必要从心理学与知识工程学的角度,研究需求驱动的多学科知识激励的创新设计方法,从而进一步解决创新的机制问题。

## 4.3 评价机制方面

从评价机制的角度,创新设计解需要主观与客观的综合评价。创新设计不仅需要满足上游的设计需求,而且需要满足下游的性能要求。然而,设计者在设计过程中往往缺乏有效的定量评价工具,只能凭借自身的主观评价来判断创新设计解是否满足要求。实质上,创新设计解需要定性与定量相结合的综合评价。因此,在未来的设计学研究中,有必要从信息学的角度,研究创新设计过程中的定量评价与协调控制,从而进一步解决创新的评价问题。

## 4.4 理论和实践相衔接方面

在未来的设计学研究中,将进一步显现设计理论与应用实践相结合的巨大威力。在创新设计过程中,设计者是创新的主体,多学科知识是创新的源泉。然而,设计者在创新过程中缺乏有效的设计系统,一方面能主动推送给设计者所需的多学科知识,另一方面能提供所需的设计工具和评价工具。从设计实践上讲,设计者需要通过创新设计软件系统来连接设计理论与实际设计过程。因此,在未来的设计学研究中,有必要从创新实践的角度,开发多学科知识激励的创新设计系统与软件工具集,并进行应用示范,从而进一步解决设计理论与创新实践问题。

## 5 结语

当前的创新设计由于需求的复杂多变,需要综合考虑跨学科的多领域设计知识,同时得到内部设计需求和外部知识激励的双重支持。此外,创新设计的质量把控也需要综合考虑上游客户的主观要求和下游性能的客观要求。因此,当前创新设计研究的焦点主要集中在创新源泉、创新机制和评价机制这三个方面。本文按照这三个方面详细介绍了近年来国内外对创新设计中多学科的知识建模、需求驱动与知识激励的设计、设计的主观与客观评价等方面的研究工作。研究结果表明,多学科设计知识驱动将成为复杂产品创新设计的有力支撑,体系化的创新设计组织框架将从资源、监督和保障等多方面为创新设计保驾护航。

## 参考文献:

- [1] GERO J S, KANNENGIESSER U. The Situated Function-Behaviour-Structure Framework[J]. *Design Studies*, 2004, 25(4): 373-391.
- [2] PAHL G, BEITZ W. *Engineering Design: a Systematic Approach*[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] SUH N P. *Axiomatic Design: Advances and Applications*[M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [4] SUN H, HOUSSIN R, GARDONI M, et al. Integration of User Behaviour and Product Behaviour during the Design Phase: Software for Behavioural Design Approach[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2013, 43(1): 100-114.
- [5] CAO D X, ZHU N H, CUI C X, et al. An Agent-Based Framework for Guiding Conceptual Design of Mechanical Products[J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(9): 2381-2396.
- [6] AKAY H, KIM S G. Design Transcription: Deep Learning Based Design Feature Representation[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2020, 69(1): 141-144.
- [7] KOTA S, CHIOU S J. Conceptual Design of Mechanisms Based on Computational Synthesis and Simulation of Kinematic Building Blocks[J]. *Research in Engineering Design*, 1992, 4(2): 75-87.
- [8] LIU J, CHEN B, XIE Y. An Improved Axiomatic Design Approach in Distributed Resource Environment, Part 1: toward Functional Requirements to Design Parameters Transformation[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 53: 35-43.
- [9] CHEN B, LIU J, XIE Y. An Improved Axiomatic Design Approach in Distributed Resource Environment, Part 2: Algorithm for Functional Unit Chain Set Generation[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 53: 44-49.
- [10] COCHRAN D S, EVERSHEIM W, KUBIN G, et al. The Application of Axiomatic Design and Lean Management Principles in the Scope of Production System Segmentation[J]. *International Journal of Production Research*, 2000, 38(6): 1377-1396.
- [11] GIOVANNINI A, AUBRY A, PANETTO H, et al. Antilogicist Framework for Design-Knowledge Representation[J]. *Annual Reviews in Control*, 2015, 39: 144-157.
- [12] CHRISTOPHE F, BERNARD A, COATANÉA É. RFBS: a Model for Knowledge Representation of Conceptual Design[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2010, 59(1): 155-158.
- [13] YANG L, QIAN L, DING S, et al. Ontology-Based Design Knowledge Representation for Complex Product[J]. *Knowledge Engineering and Management. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, 278: 277-287.
- [14] JOSKOWICZ L, NEVILLE D. A Representation Language for Mechanical Behavior[J]. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1996, 10(2): 109-116.
- [15] NA R, LI Q, GUAN Y, et al. Dynamic Analysis of Double Racks Gear 3d Roll Forming Machine[J]. *High*

- Technology Letters, 2014, 20(4): 429-435.
- [16] 苏明顺, 王继荣, 刘广涛, 等. 基于柱塞式成型机的生物质成型装备优化设计[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2017, 32(1): 99-103.  
SU Ming-shun, WANG Ji-rong, LIU Guang-tao, et al. Optimization Design of Biomass Molding Equipment Based on Plunger Molding Machine[J]. Journal of Qingdao University (Engineering Technology Edition), 2017, 32(1): 99-103.
- [17] 方伟光, 郭宇, 廖文和, 等. 基于本体的复杂产品设计知识表示和标注方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9): 2063-2071.  
FANG Wei-guang, GUO Yu, LIAO Wen-he, et al. Ontology Based Knowledge Representation and Labeling Methods for Complex Product Design[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(9): 2063-2071.
- [18] 周建慧, 刘继红, 杨海成. 面向复杂产品工程知识管理的动态本体[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(11): 1957-1964.  
ZHOU Jian-hui, LIU Ji-hong, YANG Hai-cheng. Dynamic Ontology for Complex Product Engineering Knowledge Management[J]. Journal of Computer-Aided Design and Graphics, 2016, 28(11): 1957-1964.
- [19] 殷学梅, 周军华, 朱耀琴. 复杂产品协同设计中数据建模与驱动方法[J]. 计算机应用, 2018, 38(10): 271-278.  
YIN Xue-mei, ZHOU Jun-hua, ZHU Yao-qin. Data Modeling and Driving Methods in Collaborative Design of Complex Products[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(10): 271-278.
- [20] REYES E R, NEGRY S, ROBLES G C, et al. Improvement of Online Adaptation Knowledge Acquisition and Reuse in Case-based Reasoning: Application to Process Engineering Design[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 41: 1-16.
- [21] MEDINA M J, LAGOS O K, LUNA A H, et al. Knowledge Acquisition through Ontologies from Medical Natural Language Texts[J]. Journal of Information Technology Research, 2017, 10(4): 56-69.
- [22] MADHUSUDANAN N, GURUMOORTHY B, CHAKRABARTI A. From Natural Language Text to Rules: Knowledge Acquisition from Formal Documents for Aircraft Assembly[J]. Journal of Engineering Design, 2019, 30(10): 417-444.
- [23] 郭鑫, 赵武, 王杰, 等. 面向创新设计的工艺设计知识模型及检索方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 66-72.  
GUO Xin, ZHAO Wu, WANG Jie, et al. Process Design Knowledge Model and Retrieval Method for Innovative Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 66-72.
- [24] KANG S K, PATIL L, RANGARAJAN A, et al. Ontology-based Ambiguity Resolution of Manufacturing Text for Formal Rule Extraction[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2019, 19(2): 21003.
- [25] 李琳利, 李浩, 顾复, 等. 基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1307-1319.  
LI Lin-li, LI Hao, GU Fu, et al. Multi-disciplinary Collaborative Design Modeling Technology for Complex Mechanical Products Based on Digital Twins[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1307-1319.
- [26] DE ARRUDA H F, SILVA F N, COSTA L D F, et al. Knowledge Acquisition: a Complex Networks Approach [J]. Information Sciences, 2017, 421: 154-166.
- [27] ZOU T X, WU G H, LI D Y, et al. Robust Design of UOE Forming Process Based on Support Vector Machine[J]. Materials Science Forum, 2015, 817: 523-530.
- [28] LAKE B M, SALAKHUTDINOV R, TENENBAUM J B. Human-level Concept Learning through Probabilistic Program Induction[J]. Science, 2015, 350(6266): 1332-1338.
- [29] BUSEMEYER J R. Cognitive Science Contributions to Decision Science[J]. Cognition, 2015, 135: 43-46.
- [30] LIANG J, JIANG Z, ZHAO Y S, et al. A Meta-cognition Modeling of Engineering Product Designer in the Process of Product Design[C] //Jacko J.A. Proceedings of International Conference on Human-Computer Interaction 2007. Berlin: Springer, 2007.
- [31] 荆洪英, 张均勇, 回丽, 等. 面向复杂产品的用户需求获取与分析集成模式的研究[J]. 机械设计与制造, 2015(11): 227-231.  
JING Hong-ying, ZHANG Jun-yong, HUI Li, et al. The Integration Mode of User Demand Acquisition and Analysis for Complex Products[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2015(11): 227-231.
- [32] MOON H, PARK J, KIM S. The Importance of an Innovative Product Design on Customer Behavior: Development and Validation of a Scale[J]. Journal of Product Innovation Management, 2015, 32(2): 224-232.
- [33] CHEN Y, CHAI Y, LIU Y, et al. Analysis of Review Helpfulness Based on Consumer Perspective[J]. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(3): 293-305.
- [34] LIU Y, QU Y, LEI Z, et al. Understanding the Evolution of Sustainable Consumption Research[J]. Sustainable Development, 2017, 25(5): 414-430.
- [35] 沈铭瑜, 裴乐森, 谭建荣, 等. 性能需求驱动的产品细分结构主动推送设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 287-295.  
SHEN Ming-yu, QIU Le-miao, TAN Jian-rong, et al. Active Push Design of Product Segmentation Structure Driven by Performance Requirements[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2015, 49(2): 287-295.
- [36] KUMAR P, TANDON P. A Paradigm for Customer-driven Product Design Approach Using Extended Axio-

- matic Design[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30(2): 589-603.
- [37] FARID A M, RIBEIRO L. An Axiomatic Design of a Multiagent Reconfigurable Mechatronic System Architecture[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(5): 1142-1155.
- [38] TOKUNAGA T, FUJIMURA S. A Unified Theory of Design Structure Matrix and Axiomatic Design for Product Architecture[J]. *The Journal of Modern Project Management*, 2016, 3(3): 114-122.
- [39] 王昊琪, 张旭, 唐承统. 复杂工程系统下基于模型的公理化设计方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(7): 184-198.  
WANG Hao-qi, ZHANG Xu, TANG Cheng-tong. Model-based Axiomatic Design Method in Complex Engineering Systems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(7): 184-198.
- [40] 孔建, 田莉莉. 基于智能制造的挤压铸造设备功能与特征分析[J]. *金属加工(热加工)*, 2014(23): 37-38.  
KONG Jian, TIAN Li-li. Analysis of Functions and Characteristics of Extrusion Casting Equipment Based on intelligent Manufacturing[J]. *Metal Processing (Hot Processing)*, 2014(23): 37-38.
- [41] KUO T C, WANG C J. Integrating Robust Design Criteria and Axiomatic Design Principles to Support Sustainable Product Development[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2019, 6(3): 549-557.
- [42] RAUCH E, SPENA P R, MATT D T. Axiomatic Design Guidelines for the Design of Flexible and Agile Manufacturing and Assembly Systems for SMEs[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)*, 2019, 13(1): 1-22.
- [43] LI X, QIU S, MING H X G. An Integrated Module-Based Reasoning and Axiomatic Design Approach for New Product Design under Incomplete Information Environment[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127: 63-73.
- [44] GOO B, LEE J, SEO S, et al. Design of Reliability Critical System Using Axiomatic Design with FMECA[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2019, 11(1): 11-21.
- [45] TAN R. Contradiction-oriented Problem Solving for Innovations: Five Opportunities for China's Companies[J]. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 2015, 4(1): 1-19.
- [46] 贾丽臻, 檀润华, 张换高, 等. 基于 TRIZ 实例解到领域解的类比转化过程研究[J]. *机械设计*, 2016, 33(8): 26-32.  
JIA Li-zhen, TAN Run-hua, ZHANG Huan-gao, et al. Analogical Transformation Process from TRIZ Example Solution to Domain Solution[J]. *Mechanical Design*, 2016, 33(8): 26-32.
- [47] GUO J, TAN R, SUN J, et al. An Approach for Generating Design Scheme of New Market Disruptive Products Driven by Function Differentiation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 102: 302-315.
- [48] CHERIFI A, DUBOIS M, GARDONI M, et al. Methodology for Innovative Eco-Design Based on TRIZ[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2015, 9(3): 167-175.
- [49] 李少波, 张喜根, 杨观赐. 基于 Apriori 算法的复杂机电产品功能与结构关联知识获取方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(12): 27-30.  
LI Shao-bo, ZHANG Xi-gen, YANG Guan-ci. A Knowledge Acquisition Method Based on Apriori Algorithm for Function and Structure Correlation of Complex Electromechanical Products[J]. *Modular Machine Tools and Automated Processing Technology*, 2016(12): 27-30.
- [50] 张鹏, 董娅凡, 张换高, 等. 设计过程复杂性理论与 TRIZ 理论集成复杂机电系统功能分解过程模型[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 17-24.  
ZHANG Peng, DONG Ya-fan, ZHANG Huan-gao, et al. Design Process Complexity Theory and TRIZ Theory Integrated Functional Decomposition Process Model of Complex Electromechanical Systems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 17-24.
- [51] LI P, REN G, CHEN H, et al. Innovation Design of Injection Organization and Injection Molding Process of Injection Molding Machine Based on TRIZ[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(9): 81-83.
- [52] PARK H S, NGUYEN T T, DAHAL P. Development of a New Concrete Pipe Molding Machine Using Topology Optimization[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(8): 3757-3765.
- [53] ZHANG X, YU Z, CHEN Z, et al. Modular Design Methodology of DC Breaker Based on Discrete Metal Oxide Varistors with Series Power Electronic Devices for HVDC Application[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 66(10): 7653-7662.
- [54] BAE J S, KIM J S, KIM H S. Modular Design of a Bipolar-Pulse-Power-Supply-Based LCC Resonant Converter for Strategic Mineral Exploration[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 66(9): 6846-6855.
- [55] LEE H, SEOL H, SUNG N, et al. An Analytic Network Process Approach to Measuring Design Change Impacts in Modular Products[J]. *Journal of Engineering Design*, 2010.
- [56] 朱丽娜. 基于模块化设计理念的数控深孔加工机床的研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.  
ZHU Li-na. NC Deep Hole Machining Machine Based on Modular Design Concept[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [57] 王芳. JCOE 成型机模块化设计[J]. *山西冶金*, 2017, 40(4): 44-45.  
WANG Fang. Modular Design of JCOE Forming Machine[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2017, 40(4): 44-45.
- [58] 杨黎鹏, 李维国. 含硫天然气脱硫净化装置模块化设计

- 计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019(3): 176-182.
- YANG Li-peng, LI Wei-guo. Modular Design of Desulfurization and Purification Unit of Natural Gas Containing Sulfur[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2019(3): 176-182.
- [59] 邱坤华, 倪炎榕, 明新国, 等. 基于产品族参数化模块的飞机零件工艺装备变型设计技术[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 129-133.
- QIU Kun-hua, NI Yan-rong, MING Xin-guo, et al. Aircraft Parts Technology and Equipment Variant Design Technology Based on Product Family Parameterized Module[J]. Mechanical Design and Research, 2015, 31(4): 129-133.
- [60] NANDA J, THEVENOT H J, SIMPSON T W, et al. Product Family Design Knowledge Representation, Aggregation, Reuse, and Analysis[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis & Manufacturing, 2007, 21(2): 173-192.
- [61] ALIZON F, SHOOTER S B, SIMPSON T W. Improving an Existing Product Family Based on Commonality Diversity, Modularity, and Cost[J]. Design Studies, 2007, 28(4): 387-409.
- [62] SA'ED M S. A Methodology to Redesign Heterogeneous Product Portfolios as Homogeneous Product Families [J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(12): 1065-1074.
- [63] WANG B, HUI W, ZHANG J. NX-based Parametric Design of Precision Molding Machine[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 4: 668-669.
- [64] 卞正军, 袁红兵. 基于 SolidWorks 二次开发的生化分析仪加样臂参数化设计[J]. 制造业自动化, 2017(7): 81-84.
- BIAN Zheng-jun, YUAN Hong-bing. Parametric Design of Sampling Arm of Biochemical Analyzer Based on SolidWorks Secondary Development[J]. Manufacturing Automation, 2017(7): 81-84.
- [65] NEUGEBAUER R, WERNER M, PRÖHL M, et al. New Feature Extraction and Processing Methods for the Advanced Knowledge Based Process Planning of Forming Operations[J]. Procedia CIRP, 2015, 28: 16-21.
- [66] BENDAK S, ALHAMMADI A A. A Multi-Criteria Decision-Making Approach to Minimising Fire Risk in Detached House Designs[J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2019, 17(6): 1146-1160.
- [67] MOGHTADERNEJAD S, CHOUINARD L E, MIRZA M S. Multi-criteria Decision-making Methods for Preliminary Design of Sustainable Facades[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 19: 181-190.
- [68] TRDIN N, BOHANEK M. Extending the Multi-criteria Decision Making Method Dex with Numeric Attributes, Value Distributions and Relational Models[J]. Central European Journal of Operations Research, 2018, 26: 1-41.
- [69] LIU H, JIANG L, MARTÍNEZ L. A Dynamic Multi-criteria Decision Making Model with Bipolar Linguistic Term Sets[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 95: 104-112.
- [70] WANG Y J. Interval-valued Fuzzy Multi-criteria Decision-making Based on Simple Additive Weighting and Relative Preference Relation[J]. Information Sciences, 2019, 503: 319-335.
- [71] TIWARI V, JAIN P K, TANDON P. An Integrated Shannon Entropy and Topsis for Product Design Concept Evaluation Based on Bijective Soft Set[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(4): 1645-1658.
- [72] 李洁翎, 孙伟, 丁鑫, 等. 代理模型在复杂机电系统全局敏感度分析中的应用[J]. 机械设计与制造, 2017, 1: 229-232.
- LI Jie-ling, SUN Wei, DING Xin, et al. Application of Agent Model in Global Sensitivity Analysis of Complex Electromechanical Systems[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2017, 1: 229-232.
- [73] WAN S P, QIN Y L, DONG J Y. A Hesitant Fuzzy Mathematical Programming Method for Hybrid Multi-criteria Group Decision Making with Hesitant Fuzzy Truth Degrees[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 138: 232-248.
- [74] ABDEL-BASSET M, MOHAMED M, ZHOU Y, et al. Multi-criteria Group Decision Making Based on Neutrosophic Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2017, 33(6): 4055-4066.
- [75] [75] PAMUČAR D, MIHAJLOVIĆ M, OBRADOVIĆ R. Novel Approach to Group Multi-criteria Decision Making Based on Interval Rough Numbers: Hybrid DEMATEL-ANP-MAIRCA Model[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 88: 58-80.
- [76] ERGINEL N, ULUSKAN M, KUECUEK G, et al. Evaluation Methods for Completed Six Sigma Projects through an Interval Type-2 Fuzzy ANP[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2018, 35(2): 1851-1863.
- [77] YOUNAS M, JAFFERY S H I, KHAN M, et al. Multi-objective Optimization for Sustainable Turning Ti6Al4V Alloy Using Grey Relational Analysis (Gra) Based on Analytic Hierarchy Process (AHP)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(1): 1175-1188.
- [78] BEG I, RASHID T. Modelling Uncertainties in Multi-criteria Decision Making Using Distance Measure and Topsis for Hesitant Fuzzy Sets[J]. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, 2017, 7(2): 103-109.
- [79] FEI L, DENG Y, HU Y. DS-VIKOR: A New Multi-criteria Decision-making Method for Supplier Selection[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2019, 21(1): 157-175.
- [80] VAN DORP J R. A Dependent Project Evaluation and Review Technique: a Bayesian Network Approach[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 280(2):

- 689-706.
- [81] KITAYAMA S, YAMAZAKI Y, TAKANO M, et al. Numerical and Experimental Investigation of Process Parameters Optimization in Plastic Injection Molding Using Multi-criteria Decision Making[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2018, 85: 95-105.
- [82] ULLAH A M M S, NOOR-E-ALAM M. Big Data Driven Graphical Information Based Fuzzy Multi Criteria Decision Making[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 63: 23-38.
- [83] PENG C, DU H, LIAO T W. A Research on the Cutting Database System Based on Machining Features and TOPSIS[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 43: 96-104.
- [84] HUSEYINOV I, TABAK F S. The Evaluation of Computer Algebra Systems Using Fuzzy Multi-criteria Decision-making Models: Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS[J]. *International Journal of Software Innovation (IJSI)*, 2020, 8(1): 1-16.
- [85] ZYOUS S H, KAUFMANN L G, SHAHEEN H, et al. A Framework for Water Loss Management in Developing Countries under Fuzzy Environment: Integration of Fuzzy AHP with Fuzzy TOPSIS[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 61: 86-105.
- [86] AKGÜN İ, ERDAL H. Solving an Ammunition Distribution Network Design Problem Using Multi-objective Mathematical Modeling, Combined AHP-TOPSIS, and GIS[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 129: 512-528.
- [87] ZHOU H, WANG J, ZHANG H. Grey Stochastic Multi-criteria Decision-making Based on Regret Theory and TOPSIS[J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2017, 8(2): 651-664.
- [88] FAYEK A R, OMAR M N. A Fuzzy Topsis Method for Prioritized Aggregation in Multi-criteria Decision Making Problems[J]. *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 2016, 23(5): 242-256.
- [89] VINODH S, KAMALA V, JAYAKRISHNA K. Integration of ECQFD, TRIZ, and AHP for Innovative and Sustainable Product Development[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014(38): 11-12.
- [90] MORENTE-MOLINERA J A, KOU G, GONZÁLEZ-CRESPO R, et al. Solving Multi-criteria Group Decision Making Problems under Environments with a High Number of Alternatives Using Fuzzy Ontologies and Multi-granular Linguistic Modelling Methods[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 137: 54-64.
- [91] NGUYEN H T, DAWAL S Z M, NUKMAN Y, et al. An Integrated Approach of Fuzzy Linguistic Preference Based Ahp and Fuzzy Copras for Machine Tool Evaluation[J]. *PloS one*, 2015, 10(9): e0133599.
- [92] GOK A. A New Approach to Minimization of the Surface Roughness and Cutting Force Via Fuzzy Topsis, Multi-objective Grey Design and RSA[J]. *Measurement*, 2015, 70: 100-109.
- [93] KHAN A, MAITY K. Application Potential of Combined Fuzzy-topsis Approach in Minimization of Surface Roughness, Cutting Force and Tool Wear during Machining of CP-Ti grade II[J]. *Soft Computing*, 2018: 1-12.
- [94] YUVARAJ N, KUMAR M P. Multiresponse Optimization of Abrasive Water Jet Cutting Process Parameters Using Topsis Approach[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(7): 882-889.
- [95] WANG D, YU H, WU J, et al. Integrating Fuzzy Based Qfd and Ahp for the Design and Implementation of a Hand Training Device[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2019, 36(4): 3317-3331.
- [96] KARIMI M, NIKNAMFAR A H, NIAKI S T A. An Application of Fuzzy-logic and Grey-relational Anp-based Swot in the Ceramic and Tile Industry[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 163: 581-594.
- [97] ROY T, DUTTA R K. Integrated Fuzzy Ahp and Fuzzy Topsis Methods for Multi-objective Optimization of Electro Discharge Machining Process[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(13): 5053-5063.
- [98] ZENG S, CHEN S M, KUO L W. Multiattribute Decision Making Based on Novel Score Function of Intuitionistic Fuzzy Values and Modified Vikor Method[J]. *Information Sciences*, 2019, 488: 76-92.
- [99] SINGH S, OLUGU E U, MUSA S N, et al. Strategy Selection for Sustainable Manufacturing with Integrated Ahp-vikor Method under Interval-valued Fuzzy Environment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(1): 547-563.
- [100] PATEL J D, MANIYA K D. Application of AHP/MOORA Method to Select Wire Cut Electrical Discharge Machining Process Parameter to Cut En31 Alloys Steel with Brasswire[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2(4): 2496-2503.
- [101] RAY A. Green Cutting Fluid Selection Using Multi-attribute Decision Making Approach[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2015, 96(1): 35-39.
- [102] LI A, ZHAO J, GONG Z, et al. Optimal Selection of Cutting Tool Materials Based on Multi-criteria Decision-making Methods in Machining Al-Si Piston Alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1): 1055-1062.
- [103] CEBI S, OZKOK M, KAFALI M, et al. A Fuzzy Multi-phase and Multicriteria Decision-making Method for Cutting Technologies Used in Shipyards[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2016, 18(2): 198-211.
- [104] KHAN A, MAITY K. Application Potential of Combined Fuzzy-topsis Approach in Minimization of Surface Roughness, Cutting Force and Tool Wear during Machining of CP-Ti grade II[J]. *Soft Computing*, 2019, 23(15): 6667-6678.