

【特别策划】

不确定视角下产品结构性能优化设计综述与展望

冯毅雄^{1,2,3}, 洪兆溪^{1,2,3}, 李中凯^{1,2,3}, 胡炳涛^{1,2,3}, 邱皓^{1,2,3},
张志峰^{1,2,3}, 郑浩^{1,2,3}, 谭建荣^{1,2,3}

(1.浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027; 2.浙江大学 设计工程及
数字孪生浙江省工程研究中心, 杭州 310027; 3. 湖州市碳电数字重点实验室, 湖州 313000)

摘要: **目的** 复杂产品在工程装备、航空航天等我国优先发展的战略领域中扮演着不可替代的重要角色, 在其结构设计过程中普遍存在着各种不确定性, 导致产品结构性能很难实现最优, 甚至出现重大故障。**方法** 针对复杂产品设计过程中的多粒度模糊不确定、随机不确定、不完备区间不确定和高维混合不确定等特点, 将不确定性理论与产品结构设计过程相结合, 系统地构建了不确定视角下产品结构性能优化设计理论体系, 提出了多粒度模糊不确定下产品质量特性精准提取、随机不确定下产品功能结构模块化求解、不完备区间不确定下产品结构方案多属性决策、高维混合不确定下产品关键结构可靠性优化等关键技术, 并指出了产品结构性能优化设计的未来发展方向。**结论** 此设计理论能够充分适应和利用产品设计过程的多种不确定信息, 为在结构设计环节切实提升产品性能提供了有力参考。

关键词: 复杂产品; 结构性能优化设计; 质量特性精准提取; 功能结构模块化求解; 结构方案多属性决策; 关键结构可靠性优化

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)24-0045-15

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.24.006

Review and Prospect of Product Structural Performance Optimization Design from the Perspective of Uncertainty

FENG Yi-xiong^{1,2,3}, HONG Zhao-xi^{1,2,3}, LI Zhong-kai^{1,2,3}, HU Bing-tao^{1,2,3}, QIU Hao^{1,2,3},
ZHANG Zhi-feng^{1,2,3}, ZHENG Hao^{1,2,3}, TAN Jian-rong^{1,2,3}

(1.State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2.Engineering Research Center for Design Engineering and Digital Twin of Zhejiang Province, Zhejiang University,
Hangzhou 310027, China; 3.Key Laboratory of Carbon-Electricity Digitization of Huzhou, Huzhou, 313000, China)

ABSTRACT: Complex products play an irreplaceable role in the priority strategic fields of our country, such as engineering equipment, aerospace and so on. There are various uncertainties in the structural design process for complex product, which make it difficult to achieve optimal performance, or even major failures occur. Focusing on the characteristics of multi-granularity fuzzy uncertainty, random uncertainty, incomplete interval uncertainty and high-dimensional heterogeneous uncertainties in the structural design process of complex product, the uncertainty theory and the product structural design process are integrated, and the theoretical system of product structural performance optimization design is established systematically from the perspective of uncertainty. The key technologies of accurate extraction for product quality characteristic under multi-granularity fuzzy uncertainty, modular solution for product function structure under random uncertainty, modular solution for function structure under random uncertainty, multi-attribute decision-making for product structure scheme under incomplete interval uncertainty, and reliability optimization for key structure under heterogene-

收稿日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52130501, 51935009)

作者简介: 冯毅雄 (1975—), 男, 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室教授、博士生导师, 主要从事现代机械设计理论与方法、装备数字化与智能设计、设计大数据与数字孪生、软体机器人与 4D 打印等科研方面的工作。

ous high-dimensional uncertainties are proposed, and the future development directions of product structural performance optimization design are also pointed out, providing a reference for improving product performance in the structural design process.

KEY WORDS: complex product; structural performance optimization design; accurate extraction of quality characteristic; modular solution for function structure; multi-attribute decision-making for structure scheme; reliability optimization for key structure

伴随着现代科技的飞速发展和世界经济竞争的日益激烈,精密机床、高铁列车、航天飞机、大型船舶等复杂装备在国民生产中举足轻重,成为石油化工、汽车制造、机械电子、交通运输、航空航天等国民经济支柱产业的关键支撑,为国家创造着巨大财富。同时,计算、通信、感知、控制等技术的相互融合,不同学科之间的繁荣交叉,特别是信息技术向先进设计领域的不断渗透,给复杂产品设计带来了巨大的挑战和极大的机遇。众所周知,产品结构对产品性能起着决定性作用,直接影响产品的竞争力^[1-5]。如果产品结构设计不合理,产品性能就会受到影响,在产品生产和服役时就会耗费大量资金来调整或者更换生产设备,浪费不必要的原材料和劳动力^[6]。相反,如果产品结构设计合理,产品不仅可以在功能上满足客户需求,而且在性能上也能实现最优,从而便于制造、服役与维修,降低产品成本^[7]。因此,设计人员需要在产品结构设计初期深入分析客户需求,并充分考虑产品的制造、服役、维修和回收等各个环节。

产品结构设计是一个跨学科、复杂、长周期且高度迭代的多阶段实现过程,任何细微的设计问题都可能影响最终的产品性能。进入 21 世纪以来,国内外对产品结构设计的研究逐年增多,总体上主要集中在产品结构的建模、仿真及优化等方面,这些研究为复杂产品结构设计提供了良好基础^[8-12]。与简单产品不同,复杂产品将机、电、液、控、光、磁、热等多重物理过程融于载体,具有技术需求多变、工艺过程繁琐、结构模块多、设计参数维度高、研制周期长、成本投入大、性能要求高等特点,其结构设计问题具有高不确定性和高复杂性的特征,传统以建立精确物理模型和数学模型为手段的产品结构设计技术不能充分利用和适应在设计过程中不断累积的、带有不确定性特质的多种产品数据,导致当代复杂产品常常表现出种种未曾料及的问题,甚至出现重大故障,无法满足其高性能要求^[13-14]。同时,不确定性理论的兴起与发展极大地推动了产品设计理论与方法的创新和进步。因此,研究不确定视角下产品结构性能优化设计,具有重要的理论价值和实际作用。

1 产品结构性能优化设计研究现状

客户需求是产品设计的动力和源头,如果想要通过产品结构设计实现产品性能优化,首先需要深入分析客户需求^[15]。进行客户需求分析的主要目的是明确

产品的质量功能要求。产品质量特性是对产品质量的认知与需求的多方位反映,比如对液压机来说,重量、功率、能耗、价格等都属于其质量特性^[16]。由于资源与能源等实际条件的限制,通常无法同时保障每一项产品质量特性,需要从众多产品质量特性中提取最重要的质量特性,即关键质量特性^[17]。这一步有利于明确产品最核心的质量功能要求,指导如何在有限的资源与能源条件下最大程度地优化产品性能。完成产品质量特性提取以后,需要寻找能够满足对应质量功能要求的产品结构,即进行产品功能结构求解,获取功能结构模块^[18]。求解出产品功能结构以后会生成一系列产品结构方案以供选择,此时很难对这些备选结构方案的性能进行精准定量计算,需要结合专家评价对其进行考虑多种因素的评价筛选,从而确定最佳产品结构方案,这是一个典型的多目标、多层次的多属性决策问题^[19]。这时的产品结构主要指整个产品的特征结构、形状与尺寸,尚未包括零部件的具体参数。确定最佳产品结构方案后则需要进行产品关键结构的性能优化,获取关键结构的具体参数^[20]。产品结构性能优化设计流程及其关键技术见图 1,其中关键技术主要包括质量特性提取、功能结构求解、结构方案决策与关键结构优化,每一个技术环节都是对前一个技术环节所获结果的具体化和改进,直至设计出性能最优的产品结构。近几十年来,国内外学者围绕这些主题开展了大量研究。

1.1 产品质量特性提取研究现状

客户需求是促进企业优化与产品创新的原始力量,准确全面地识别和理解客户需求是产品结构设计成功的基石^[21]。产品质量特性是产品质量的载体,能够多角度反映对产品质量的认知与需求,涵盖功能性、可靠性、安全性、耐用性、经济性等各方面的性能技术指标及其技术参数^[22]。将客户需求映射为产品质量特性可以进一步明确产品的质量功能要求,有效指导后续的产品结构设计。通常,产品结构设计受到人力、物力、资源与能源等各方面的制约,无法同时保证所有产品的质量特性,如果同时保证所有的产品质量特性则难以兼顾社会、企业和客户等多方面的利益,需要从中提取出对产品质量具有决定性作用或重大影响的质量特性(关键质量特性),用以指导在特定的约束条件下实现产品质量最优。近年来,国内外学者围绕客户需求到产品质量特性的推演过程进行了诸多研究。

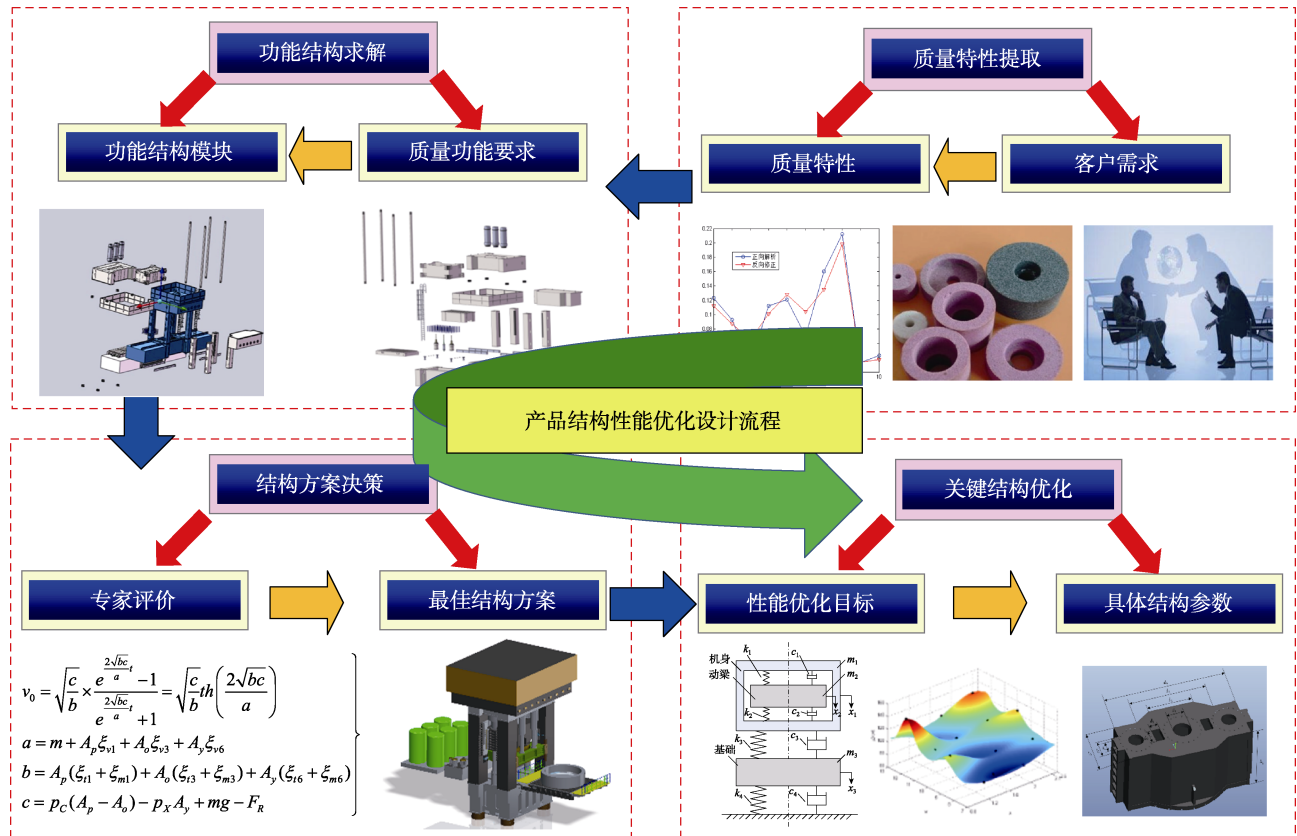


图 1 产品结构性能优化设计流程及其关键技术

Fig.1 Process and key technologies of product structure performance optimization design

Krishnapillai 等人^[23]在产品自适应定制设计中使用质量功能展开 (Quality Function Development, QFD) 作为从客户需求到产品质量特性的映射工具, 构建了以定制设计指数为基础的映射规则, 将产品质量特性分为平台质量特性、定制质量特性和非定制质量特性 3 类, 并指出随着客户需求到产品质量特性映射过程的完成, 产品定义逐渐清晰化和确定化。Wang 等人^[24]指出明确客户需求与产品质量特性之间的映射关系是大型复杂产品方案设计的关键一步, 基于模糊集理论计算了各项客户需求和各项质量特性的相对重要度, 该计算方法能够充分适应产品设计初期数据的不精确性、模糊性和不一致性。Jin 等人^[25-26]分析了 QFD 中从线上客户需求到产品质量特性的自动转换过程, 从概率语言的角度开发了综合影响学习算法, 深入挖掘客户需求中关键词与邻近词的统计并发信息, 据此推测在特定的客户需求语境中所隐含的产品质量特性。Li 等人^[27]研究了互联网环境下开放式设计的产品质量特性重要度, 指出在开放式设计中存在大量使用自由文本表达的、不带有目的性指导的客户需求, 提出了一种基于模糊 QFD 的扩展概率语言计算方法, 聚焦于使用客户需求中的模糊信息计算质量特性重要度。

唐晓青团队^[28-30]提出了基于关键质量特性的产品保质设计, 指出定义和分解产品关键质量特性是实

现产品六西格玛设计 (Design For Six Sigma, DFSS) 的核心部分, 针对传统研究只侧重从上层质量功能分解下层关键质量特性的缺陷, 以公理设计的功能树和结构树为原型, 实现了从客户需求到关键质量特性的映射, 通过粗糙集完成了产品质量特性重要度的系统化定量计算。张根保团队^[18-19, 31-33]指出复杂机电产品的质量特性繁多, 如果把每个质量特性分别控制在合格范围内, 无法实现企业和客户共赢, 而且这些质量特性对客户满意度提升的作用不同, 应该区别对待; 提出基于功能—运动—动作分解和粗糙集的关键质量特性映射变换技术, 建立了基于人工神经网络的复杂机电产品关键质量特性提取模型; 明确了复杂机电产品不同子系统、不同层次之间存在不同的多元质量特性, 其重要度排序过程中存在模糊性、随机性和主观随意性, 实现了融合模糊 AHP、信息熵和模糊 Borda 的多元质量特性重要度排序。安相华等人^[34]针对复杂产品中客户需求与产品质量特性映射过程中存在的耦合性问题, 提出了复杂产品质量特性的耦合映射及实现水平确定方法, 利用模糊决策与实验评价实验室 (Decision-Making and Trial Evaluation Laboratory, DEMATEL) 确定客户需求重要度, 借助 Choquet 模糊积分计算了反映耦合性关系的质量特性重要度。由此可见, 产品质量特性提取为保证产品质量指明了方向, 对优化产品性能具有直接作用, 其过程多以客户

的模糊语言为起点,带有明显的模糊不确定性,并受到经济、工艺、环境等多方面制约。现有研究为实现模糊条件下的产品质量特性提取奠定了良好的基础,但是其考虑到的客户模糊语言多是单一粒度的。在实际的产品设计过程中,由于知识背景、表述能力及喜好不同,客户经常灵活采用不同粒度的模糊语言给出产品需求的相关信息,多粒度模糊不确定条件下的产品质量特性提取技术需要进一步探索。

1.2 产品功能结构求解研究现状

通过产品质量特性提取明确了产品的质量功能要求以后,为了寻找能够满足质量功能要求的产品结构,需要进行产品功能结构求解。国内外许多学者已经针对产品功能结构求解提出了多种理论和方法,结合功能结构求解的研究现状以及产品设计学的特点,可以看出产品功能结构求解的本质是找出从总功能需求根结点到定性结构终端结点的路径集合及其后续优化过程。功能结构映射^[35]、功能结构模块划分与配置^[20,36]等是产品功能结构求解的代表性研究方向,且各个研究方向之间并非完全独立,可能存在交叉重叠^[37]。

功能结构映射即从实现产品功能的角度出发,找出能实现产品抽象功能的具体结构组成,相关代表性的研究有:Gero^[38-39]将产品的功能、行为和结构之间的关系称为功能—结构—行为(Function Behavior Structure, FBS)通道或者因果知识,基于FBS通道,可以求解实现给定功能的行为和结构,也可以求解给定结构对应的预期行为和功能,同时指出了一个结构可能对应多种功能,一个功能也可能对应多种结构。Suh^[40]提出了面向产品设计等多领域的公理化设计方法理论框架,根据功能需求形成设计目标,以独立公理和信息公理为准则,进行设计参数调整与设计方案的择优,构建设计参数—工艺变量的映射模型,将设计过程划分为客户域、功能域、物理域和过程域,加速了设计过程的计算迭代与随机搜索。Russo 等人^[41]从FBS理论的角度出发,分析了用以求解创新产品设计方案TRIZ理论的40条功能结构映射法则,对于产品功能与产品结构之间的关联关系进行了革新定义,帮助设计者快速识别自身对产品功能结构进行改进的可能性。谢友柏团队^[9,42]深入研究了基于需求—功能—结构—行为(Requirement Function Behavior Structure, RFBS)的产品设计模型,指出产品RFBS模型中的功能知识集成算法已经取得较大进展,而结构知识由于复杂性较高尚未获得合适的知识表达方案,结构知识集成目前仍需人工参与。

檀润华团队^[43-45]针对现有产品功能结构创新设计过程不能及时动态地反应用户需求的问题,提出了功能创新设计驱动的产品设计方法,针对不同需求目标选取对应功能进化改进定律,发现用户性能需求发

展,实现了产品功能与产品需求的并行进化,构建了基于产品基因与物理表达的功能原理层的产品变型设计模型。李彦团队^[46-47]提出了基于核心功能约束的产品概念设计方法,以产品核心功能的设计结果作为辅助功能设计的约束条件,在核心功能实现的前提下约束各辅助功能实现的结构方案数量,缩小了形态分布矩阵的设计组合方案复杂度,并运用产品功能结构的理念改善了工程技术知识文档的特征提取效果,探索了产品功能结构与人工智能技术的结合应用。邹慧君团队^[48-49]提出了基于FBS映射的机构系统概念设计模型,实现了功能—行为与行为—机构的联动连贯映射,给出了基于有效工作时段的功能—动作映射矩阵构成步骤,设定了执行机构系统方案的评价准则和量化指标,构建了行为—机构映射的优化模型并给出了求解方法。

谭建荣团队^[50-51]提出了基于赋权自动机的定制产品功能结构映射方法,通过半环赋权自动机实现单约束线产品的功能结构映射,将多约束树型产品功能结构析取为若干相对独立的单约束线产品功能结构,通过对所有解进行合取完成多约束树型产品功能结构映射;借助产品功能结构映射与约束满足问题的相似性,将产品功能结构求解映射到约束满足框架中,并以此提出了基于需求满足的产品质量特性—功能—结构多域映射方法。唐敦兵等人^[52-53]在保证设计质量的前提下,提出了一种基于矩阵的产品功能结构自动生成方法,建立了包含子功能和人工组件关系的产品功能模型,通过构造产品形态矩阵、功能部件矩阵和设计结构矩阵(Design Structure Matrix, DSM),在设计早期求解了功能结构的可行解并完成排序择优;提出了一种结合蚁群算法的矩阵算式产品功能结构优化方法,将功能结构求解转化为组合优化的最优路径问题,直接优化了产品功能结构,解决了通过矩阵算式求解元功能链功能结构时缺乏优化工具的问题。冯培恩等人^[54]指出多对称机械产品的功能结构方案主要由功能串并联分解和组合、功能交叉串并联、功能循环、功能选择和决策等形式连接而成,提取了进行产品功能结构设计时的规律性知识,求解了具有多对称特征的海浪发电装置功能结构方案。

同时,随着制造业的快速发展,复杂产品中包含的多种物理过程种类越来越多,其设计、仿真和优化分析过程中结构尺寸参数数目多、参数来源多样广泛、性能参数维度高且耦合关联复杂。功能需求和设计参数的数目越多,其耦合关联对产品设计运行的影响就越大^[55-56]。充分考虑产品零件之间的耦合关联,进行功能结构模块划分与配置,对于提高产品性能和降低产品成本具有重要意义^[57]。围绕产品功能结构的模块划分与配置,代表性的研究有:Khalaf 等人^[58]指出模块划分策略可以通过有限的产品模块快速生成一系列不同的产品,提出了基于冗余化和标准化的

定制产品族模块选择和供应链优化技术,实现了在一定时间限制内的产品生产与运输费用最小化,显著提高了客户对产品族配置设计的满意度。Badurdeen 等人^[59]提出了一种覆盖完整产品生命周期的多目标产品功能结构配置设计方法,考虑了从原料制备到报废回收的完整产品生命周期,通过改进非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)求解功能结构配置的 Pareto 最优解,有效平衡了经济性能和环境性能等相互冲突的优化目标。

Li 等人^[60]研究了基于定量指标和模糊算法的两阶段复杂产品适应性平台设计方法,利用可视化模糊聚类将产品平台模块划分成标准平台模块和灵活平台模块,将灵活平台模块的组件细分为通用组件和可伸缩组件两种类型,有效克服了传统适应性产品平台设计中由于功能模块分类依据不足与过度依赖经验阈值而导致的模块分类结果不稳定等弊端。Zheng 等人^[61]针对现有产品功能结构配置设计大都局限于只能在单个企业内部的产品族中进行、不能充分满足日益增长的个性化客户需求等问题,基于适应性开放产品平台实现模块化设计和可扩展设计,提出了一种能够联接多个产品制造企业的产品功能结构个性化配置框架,保证了产品功能结构个性化配置的适应性和可扩展性。Dou 等人^[62-63]指出企业增加产品功能结构配置的多样性可以使产品更大限度地适应顾客的个性化需求,提出一种结合 Kano 模型和社会惯性的改进模糊聚类算法,有效实现了批量定制产品的功能结构智能配置,配置出的产品功能结构虽然种类较少但是却能满足顾客的多种个性化需求,提高了产品功能结构的配置效率。Wei 等人^[64]提出了基于多目标遗传算法与模糊选择机制的产品功能结构配置技术,有利于实现产品功能结构在使用性能、加工成本和制造时间等多方面的统筹考虑。

顾佩华团队^[65-66]针对现有产品模块规划方法难以同时考虑模块划分数量和模块类型规划的问题,提出了以公理设计为分析框架、以 QFD 为模型的产品模块划分与分类方法,建立了产品功能需求与功能结构之间的映射模型,制定了产品模块类型的分类准则,有助于确定开放式结构产品的模块划分数量与模块类型规划。刘晓冰团队^[67-68]基于变个体长度的改进混合蛙跳算法求解了产品族零件的聚类模块,能够为不同层次和规模的客户群体设计出符合自身需求的产品;提出了基于递阶支持向量机的模块化产品族配置性能预测方法,挖掘产品族中典型产品的历史数据库,提高了算法的局部搜索能力和收敛速度,实现模块化产品族配置性能的快速准确预测。肖人彬团队^[69-70]提出基于公理设计和设计关联矩阵的产品平台设计新方法,利用可拓聚类算法对产品设计关联矩阵进行聚类分析,完成产品模块划分,并对所划分的产品模块再次进行功能独立性分析,进一步提高了产

品平台的通用性;将产品族内部的耦合分为平台模块之间的耦合、平台模块和定制模块之间的耦合以及定制模块之间的耦合,将激励零件看作可控元素并借助实验技术手段衡量其对设计目标的影响,从耦合发生路径和相关影响程度的角度研究了产品族模块之间的耦合关系,求得了各个模块的实现序列。侯亮等人^[71]针对现有产品族动态演进机制难以解决产品族世代化创新的不足,构建了产品族的需求—功能—技术映射关系模型,结合创新思维通用理论和问题流网络技术发现并解决了产品族创新设计中的冲突问题,实现了产品族功能模块多样性程度的可计算。

由此可见,产品功能结构的模块化技术是满足客户多样化需求、提升产品质量、降低产品成本的重要手段,有利于改善产品整体性能。虽然现有研究为复杂产品的功能结构模块化求解奠定了良好基础,但是忽略了产品性能均衡的重要性,考虑到的零件耦合关联也较为片面。同时,维修性能是客户在使用阶段最为关注的产品性能之一,与零件维修时间、故障次数等因素密切相关,这些因素普遍服从一定的概率分布^[72-76],然而其随机不确定特征却没有被充分重视。以性能均衡为目标、考虑随机不确定条件并兼顾全面耦合关联的产品功能结构模块化求解技术需要进一步探索。

1.3 产品结构方案决策研究现状

产品结构方案决策的输入是难以用肉眼直接判断优劣的一系列备选的产品结构方案,输出是最佳的产品结构方案,需要全方位考虑产品的市场需求、材料成本、使用性能、加工工艺、后期维护等各个方面,这是一个典型的多属性决策过程^[77]。在过去的几十年中,许多学者已经对多属性决策做了大量的研究,出现了许多多属性决策方法,包括模糊评价法^[78]、模糊 AHP^[79]、灰色理论^[80]、最佳化妥协解方法(Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje, VIKOR)^[81]、TOPSIS^[82]等。此外,在当前多属性决策领域还出现了一些智能算法,如神经网络和蚁群算法等^[83]。综合来说,产品结构方案决策领域代表性的研究有:

Ayag^[21]指出了产品结构方案决策可以通过对备选方案的打分排序减少备选方案的数量,这对于增强企业市场竞争力非常关键,先通过 AHP 实现了产品结构方案的初步评估,再结合仿真分析对初步评估结果中取得较好成绩的结构方案进行经济性分析,得到兼顾成本和收益的最佳产品结构方案。Benitez 等人^[84]提出了一种面向后期维护的产品结构方案动态决策方法,以一种客观应用途径引入 AHP 实现产品结构方案决策过程的属性权重计算,摆脱了传统 AHP 对专家主观评价的依赖,选择出的产品结构方案非常接近于理想方案。Zoran 等人^[85]提出了产品结构方案的

二次决策技术,把决策专家分为结构专家、经济专家和技术专家,采用 VIKOR 和 TOPSIS 两种多属性决策方法进行产品结构方案选择,比较两种方法决策结果的差异性,并通过专家二次决策判断哪种决策方法选出的产品结构方案更合理。Mian 等人^[86]将决策技术引入制造业的逆向工程,指出了数字化产品结构方案的合理决策对于逆向工程非常重要,融合 AHP、群组特征根法和信息熵计算电子产品结构方案决策属性的重要度,借助淘汰选择表达机制、TOPSIS 和权重相加实现了备选结构方案排序。Cheng 等人^[87]提出了一种基于新型异构 TOPSIS 的复杂产品结构方案决策方法,其应用不需要以各个属性之间的相互独立为前提,通过结合可能性度法则、相对偏好关系和属性转换技术实现了混合类型的属性归一化。

孟祥慧等人^[88]对机械产品性能退化问题进行了研究,提出了面向时变性能的设计决策理论和方法,构建多学科耦合的复杂过程瞬态行为模型,采用多学科瞬态行为仿真与系统退化过程模型推算系统时变性能,并结合时变性能预测和耐久性实验对系统退化模型进行了修正,给产品结构方案的设计决策提供了理论依据。张彬彬等人^[89-90]研究了产品中关键并列机构与核心部件的评价方法,首先针对并联机构进行动力学建模,结合虚功原理和动能分析,提出了评价机构各向同性性能的两个指标,然后结合最小二乘算法,提出了一种兼顾计算精度和计算效率的核心部件精度快速测量与评价算法,为改善复杂产品性能提供了参考数据。杨涛等人^[91-92]提出了一种基于客户偏好聚类分析的产品结构方案决策方法,在概念设计阶段利用图论完成需求偏好相似的客户聚类,结合优势数分析实现各客户聚类对应的最优产品结构方案评价,增强了产品满足个性化与多样化客户需求偏好的能力。陈健等人^[93]针对云环境中众包产品结构造型方案在制造过程中的决策问题,从工业设计角度出发,依据产品在设计与制造阶段的不同决策场景,由专家与众包成员共同制定评价目标并构建结构造型方案的决策模型,采用灰色关联度分析法求解了与理想方案最接近的众包产品结构造型方案。吴扬东等人^[94]针对目前产品结构方案优劣判断主要依赖设计者的经验和水平的问题,提出了一种数据驱动的适用于各个设计阶段的产品结构方案多属性决策技术,每一组评审者基于 TOPSIS 对产品结构方案进行评估,并应用 Borda 函数法对各组决策结果进行集结,对数据利用更加充分,在一定程度上避免了结构方案决策结果的主观性。

由此可见,产品结构方案决策过程需要考虑的结构方案属性众多、计算复杂,而且具有明显的认知不确定特征。虽然现有研究为复杂产品结构方案的多属性决策奠定了良好基础,但是大多是通过模糊数、区间数或者二者结合的形式表达专家的不确定评价信

息,并假设专家评价数据完备。在实际的复杂产品结构方案决策过程中,专家评价数据很有可能存在轻微幅度的残缺,即评价数据存在不完备性。同时,模糊数可以借助模糊数学中的 λ -截集思想转变成 λ -截集下的区间数^[95],模糊数和区间数共存时二者可以统一用区间的形式表达。因此,在不完备区间不确定条件下的产品结构方案多属性决策技术需要进一步探讨。

1.4 产品关键结构优化研究现状

确定了最佳产品结构方案后则需要进行产品关键结构优化,获取关键结构具体参数,这是实现产品性能改进和轻量化设计的重要途径^[22,96]。拓扑优化设计、可靠性优化设计、鲁棒性优化设计等都是关键结构优化设计的研究热点^[97]。

结构拓扑优化是根据给定的负载情况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化,设计自由度大,设计空间广阔。近年来,拓扑优化在理论和应用方面都得到了飞速发展,已经形成了以变密度法、水平集法和渐进结构优化方法等为代表的理论体系。Zhou 等人^[98]从多材料设计、非线性问题和各项异性等角度研究了结构拓扑优化中多种材料的插值测量。Lee 等人^[99]提出了基于序列等效静载荷的结构非线性动态拓扑优化设计方法。Goo 等人^[100]提出了具有弯曲应力约束的结构拓扑优化方法,结合 QP 松弛法插值和有限元软件 ANSYS 建模,快速实现了应力约束下的结构目标性能最优。Kang 等人^[101]提出了一种简单有效的附加超弹性技术,有效地解决了超弹性材料中结构拓扑优化的数值计算困难。张卫红等人^[102]提出了构型结构与组件位置混合参数联合拓扑优化,使高性能整体式构型设计成为现实。刘成颖等人^[103]基于有限元动力学分析找出了影响产品整体性能的关键结构,提出了一种集成拓扑优化、筋板形式选择与布局,以及尺寸优化的关键结构性能优化方法。张宪民等人^[104-105]开展了基于并行策略、最大应力约束、无棋盘格约束、基础结构法、可靠性约束等的柔顺机构拓扑优化设计,并指出了柔性机构拓扑优化中的几何非线性问题,为解决柔性机构的应力集中和疲劳可靠性差等问题进行了有效的探索。

鲁棒性优化强调使设计出的产品结构对不确定性因素变化敏感度低、性能波动小。Garambois 等人^[106]提出了基于混合超元与遗传算法的板材结构多目标稳健优化技术,结合有限元分析模型,探索如何在满足最大应力的条件下实现板材的质量最轻。Sun 等人^[107]建立了以应力峰值为优化目标、以能量吸收比为约束的结构稳健优化模型,并提出基于连续田口的结构离散稳健优化算法实现求解。谭建荣团队^[108-110]结合自适应 Kriging 模型,利用带约束的非支配排序遗传算法求解结构动力特性的鲁棒优化模型,减小了产品动态特性在不确定性条件下的波动;指出复杂结

构的稳健优化通常会涉及一系列相互冲突的结构性能指标,提出了一种基于嵌套遗传算法的区间稳健均衡设计方法。

可靠性优化强调使设计出的产品结构正常工作的概率不低于允许的可靠度最小值。Wang 等人^[111]研究了基于区间模型的非概率结构可靠性优化方法,构建了结构可靠性优化的双层嵌套模型,对线性功能函数和非线性功能函数分类处理,大幅度减小了非概率可靠性优化的计算成本。Lin 等人^[112]面向产品关键结构的抗撞性、模态特性和轻量化水平,提出了基于混合元模型精度改进策略的结构可靠性多目标优化技术,选取具有几何公差的零部件尺寸作为设计变量,借助多目标粒子群优化算法完成求解。张义民团队^[113-116]提出了机械装备的动态和渐变可靠性的系列理论与技术,开展了避免共振的频率可靠性分析,研究了多失效模式下的机械结构动态可靠性设计,制定了机械产品的可靠性大纲,构建了可靠性优化设计、可靠性灵敏度设计和可靠性稳健设计的成组理论与技术体系,研究了有限概率信息的机械系统的可靠性设计方法。王立平团队^[117-119]依据 Wiener 过程建立了数控转台性能退化过程的数学模型,结合极大似然法与实验数据分析进行了模型参数估计,基于性能退化数据和虚拟增广理论评估了数控转台的可靠度,通过扩充实验数据的方法探讨了数控转台在小样本情况下的可靠性分析。韩旭与姜潮团队^[120-122]发展和完善了凸模型、概率—区间混合、证据的 3 类可靠性分析方法,建立了非概率可靠性度量指标,较好地解决了传统可靠性分析对于精确概率分布的依赖性问题;将同伦算法引入产品可靠性功能度量,对于非线性程度较大的极限状态方程有更稳健的收敛性能;考虑了可靠性分析和可靠性计算之中变量的相关性,改善了复杂结构可靠性优化设计的实际效果。

拓扑优化、鲁棒性优化和可靠性优化等虽然侧重点不同,但是都为完善产品关键结构提供了有力的工具。随着工业技术的发展,复杂产品的性能参数日益提高,产品的性能和可靠性问题也越来越突出。同时,由于工程实际的复杂性和统计数据的相对缺乏,使得可靠性优化中的不确定参数类型多种多样且维度越来越高,目前虽然可靠性优化研究为产品关键结构优化奠定了良好的基础,但是随机不确定性与区间不确定性共存且维度较高条件下的复杂产品关键结构优化时仍然面临计算量大、计算效率低等问题,需要进一步探讨。

2 现有产品结构性能优化设计的不足

产品结构性能优化设计从客户需求出发,历经质量特性提取、功能结构求解、结构方案决策和关键结构优化等多个技术环节,随着设计进程的推进,可利

用的设计信息也是由贫瘠到丰富逐渐变化的。迄今为止,国内外学者已经对产品结构设计进行了深入研究,为保证产品设计成功打下了坚实的基础。然而产品结构性能优化设计的不同阶段包含了不同的不确定因素,现有的产品优化设计理论未能针对结构性能优化设计中各个阶段的不确定特征进行充分挖掘,产品结构性能优化技术及其应用还远远未达到成熟的地步,主要表现在:

1) 客户模糊语言中的多粒度现象被忽视、客户重要度计算不合理,导致产品质量特性提取不精准。产品质量特性精准提取的基础是正确计算客户需求重要度,正确计算客户需求重要度的基础又是正确计算客户重要度。现有的质量特性提取方法大都是针对所有客户需求,对某位客户分配相同的重要度,然而客户对各项客户需求的了解程度不同,各项客户需求下的客户重要度应当有所区分,因此需要计算各项客户需求下的细粒度客户重要度。客户在产品初期给出的多粒度模糊语言是计算细粒度客户重要度的桥梁,当前未被充分重视并利用,导致产品设计初期客户需求数据集结不准确、质量特性提取不精准。

2) 产品功能结构求解考虑到的耦合关系不全面,且忽略多种随机不确定性因素,产品功能结构模块性能不均衡。现有的产品功能结构求解虽然已经开始通过模块划分提高产品质量,但是一般只考虑了功能耦合、空间耦合和信息耦合,对于材料耦合、拆卸耦合、回收耦合等产品生命周期内存在的其他多方面的耦合关联没有进行统筹考虑,所建立的产品功能结构优化模型也把很多带有随机不确定特征的设计变量视为确定值,模型准确度较低并且浪费了大量随机不确定产品数据,求解出的功能结构模块本质上仍然停留在满足配置功能的层面,无法保证性能均衡。因此,需要从产品生命周期的角度统筹考虑功能结构零件之间的多种耦合关联,兼顾随机不确定性因素对产品性能带来的影响,保证产品功能结构模块性能均衡。

3) 产品结构方案决策过程需要考虑的属性繁多,计算量过大,并且缺乏对不完备区间数据的考虑。从产品结构方案决策的研究现状来看,为了保证结构方案能够同时满足客户、企业、市场、社会的不同层次需求,产品结构方案决策需要考虑的评价属性数量繁多,决策过程所需数据量也不断增多。在实际工程中普遍难以获取如此大量的精确数据,很多时候只能获取数据的边界范围,甚至连有些数据的边界范围都无法得知,导致在产品结构方案决策数据中不完备性和区间不确定性共存,现有的大多数决策方法不再适用。因此,需要研究更加合理的产品结构方案决策方法,解决因属性过多而带来的计算量大与成本高的问题,并适用于不完备区间形式的决策数据,提高产品结构方案决策的可操作性。

4) 高维混合不确定条件下的产品关键结构可靠

性优化有待深入研究。现有产品关键结构可靠性优化研究大多只考虑随机不确定性或区间不确定性,很少考虑随机不确定性与区间不确定性的混合不确定关键结构可靠性优化方法普遍适用于不确定变量维度较低的场合,对于高维混合不确定条件下的关键结构可靠性优化仍然存在计算量大与计算效率低等局限性。因此,需要研究高维混合不确定下的产品关键结构可靠性优化技术,减小计算量并提高计算效率。

3 不确定性视角下产品结构性能优化设计关键技术

复杂产品结构设计覆盖多个交叉领域,特别是不同结构设计阶段存在具有不同特征的不确定现象,使得复杂产品的结构设计十分困难,无法满足复杂产品的高性能需求^[123]。对符合工程实际的不确定性视角下产品结构性能优化设计问题进行深入研究具有较强的理论价值和现实意义。本文以浙江大学机械工程学院谭建荣课题组为依托,以国家优秀青年基金项目“现代机械设计理论与方法”、国家科技重大专项“高档数控机床数字化设计方法、工具集与应用(二期)”、浙江省自然科学基金项目“支持创新设计的机械产品正向设计理论、方法及应用研究”的理论和技术为基础,深入分析产品结构性能优化设计过程中各种不确定现象,针对多粒度模糊不确定下产品质量特性精准提取、随机不确定下产品功能结构模块化求解、不完备区间不确定下产品结构方案多属性决策以及高维混合不确定下产品关键结构可靠性优化等技术进行了系统性研究,构建了不确定性视角下产品结构性能优化设计技术体系,其关键技术如下:

1) 多粒度模糊不确定下基于逻辑相似的产品质量特性精准提取。针对客户需求数据集过程中客户重要度分配不合理等问题,以通过分析客户需求明确产品的质量功能要求为目的,提出了多粒度模糊不确定下基于逻辑相似的产品质量特性精准提取技术。分析客户对同类相似产品的多粒度模糊语言评价,引入优势粒结构计算了反映逻辑相似度的各项客户需求下的细粒度客户重要度,结合灰关联分析计算出更加合理的客户需求重要度;采用区间粗糙数(Interval Rough Number, IRN)进行产品 QFD,在客户需求与质量特性的关联程度转换中充分保留粗糙数计算的简便性与区间数表达的灵活性,确定面向客户需求的质量特性重要度;建立了产品质量特性精准提取的多目标优化模型,并设计了分域变步长改进果蝇优化算法实现求解。

2) 随机不确定下基于性能均衡的产品功能结构模块化求解。针对复杂产品功能结构模块化求解过程中需要兼顾产品生命周期内的多种耦合关联及多种随机不确定性因素等问题,以提高产品功能结构在实

际工程中的综合性能均衡性为目的,提出了随机不确定下基于性能均衡的产品功能结构模块化求解技术。考虑到产品功能结构零件耦合关联在产品生命周期中设计、制造、服役、维修、报废、回收等多个阶段的不同表现形式,构建了功能结构零件的产品生命周期耦合关联 DSM;针对产品功能结构零件聚类过程中计算量大与复杂度高等问题,先将功能结构零件的产品生命周期耦合关联 DSM 转化至二维平面,然后进行模糊 C 均值聚类(Fuzzy C-means Clustering, FCM)以获取功能结构初始模块;以功能结构初始模块的最小描述长度为约束,以质量趋同度、质量独立性、平均单位时间维修成本为优化目标,考虑零件维修时间、故障次数等多种随机不确定因素,构建了功能结构模块性能均衡的随机机会约束规划模型,并提出了嵌套蒙特卡洛模拟的多目标离散布谷鸟算法实现求解,获取了性能均衡的结构功能模块,提高了功能结构模块的综合性能。

3) 不完备区间不确定下基于属性约简的产品结构方案多属性决策。针对复杂产品结构方案决策过程中可能要考虑的决策属性过多、决策数据中区间与不完备现象共存等问题,以提高复杂产品结构方案决策的效率与准确度为目的,提出了不完备区间不确定下基于属性约简的产品结构方案多属性决策技术。充分贴近了不完备区间不确定下产品结构方案决策实际场景,引入不完备区间信息系统实现了结构方案决策属性分布约简,获得了能够保证复杂产品结构方案决策效果的最小属性集;引入协同过滤算法完成了决策过程不完备区间信息的快速准确补全,将 IRN 融入 DEMATEL-ANP(DANP)与多属性边界逼近区域比较(Multi-Attribute Boundary Approximation Regional Comparison, MABAC),实现了结构方案属性的因果作用关系判断与重要度计算,快速获取了备选结构方案的属性边界逼近区域与优劣排序结果。

4) 高维混合不确定下基于降维积分的产品关键结构可靠性优化。针对复杂产品关键结构可靠性优化中存在包含区间不确定性与随机不确定性的高维混合不确定性、难以直接实现准确快速求解等问题,以提高复杂产品关键结构可靠性优化的计算效率为目的,提出了高维混合不确定下基于降维积分的产品关键结构可靠性优化技术。将关键结构的可靠性优化看作是双层嵌套过程,建立了同时考虑区间变量和随机变量的高维混合不确定下产品关键结构可靠性优化 Kriging 近似模型,内层依据降维积分原理,对关键结构功能函数进行随机变量的单变量降维和区间变量的泰勒展开,获取功能函数上下界的表达式,再结合高斯积分快速计算产品关键结构的可靠度下界;外层是以多目标粒子群算法为主导的迭代寻优,以内层分析得到的可靠度为依据,对满足可靠度要求的设计向量进行目标函数寻优,获取最优设计向量。

4 产品结构性能优化设计研究展望

产品结构性能优化设计是一个盘根错节的系统工程,以客户需求分析为起点,包含质量特性提取、功能结构求解、结构方案决策和关键结构优化等多个技术环节,涉及节能环保、模糊数学、数据挖掘、数值积分、人工智能、复杂产品建模、现代设计理论等多个领域。在现有方法不足的基础上,本文提出并深入研究了不确定视角下产品结构性能优化设计,虽然取得了一定进展但是仍有较多不足之处,未来的工作主要集中于以下几点。

1) 现代社会中很多复杂产品的设计过程都需要不同国家、不同地区的多个研究机构共同完成。本文所提出的产品结构方案决策技术虽然考虑到了以多位决策者为基础的群决策,但是决策者和产品数据的数量级仍然相对较小,很多相关的产品数据没有得到有效利用。下一步研究需要聚焦于将大数据与物联网技术融入复杂产品的结构方案决策过程中,充分利用所能搜集到的海量产品数据。

2) 产品材料与产品结构性能优化密不可分,通过宏观尺度上的结构性能优化和微观尺度上的材料优化,兼顾宏观与微观的双尺度不确定性,有利于实现更高层次的产品性能优化。本文所提出的产品关键结构可靠性优化是在产品材料已经确定的前提下进行的,没有考虑到产品材料的优化设计。下一步研究需要聚焦于在产品结构性能优化设计过程中同步完成产品材料的优化设计,实现产品材料优化服务于产品结构性能优化。

3) 在产品的质量特性精准提取阶段、功能结构模块化求解阶段、结构方案多属性决策阶段以及关键结构可靠性优化阶段,各自包含受不确定因素影响的若干个设计目标,这些不确定因素究竟是如何随着产品结构的设计过程不断推进而实现耦合关联与传播演变,现在仍然是未知的。下一步研究需要聚焦于在复杂产品结构设计过程中多种不确定因素之间的耦合关联作用机制与传播演变内在机理。

4) 根据实际情况,产品结构设计过程中的不确定参数往往有不同的表现形式,如概率分布数据、小样本测试数据、专家评价数据等。在现有的混合不确定分析中,对随机、认知等参数不确定性的度量主要基于概率模型、凸模型、模糊集合、证据理论等多种理论分析方法。下一步研究需要聚焦于构建复杂产品结构设计过程中混合不确定性的统一度量模型,简化复杂产品结构不确定性的分析流程,同时推动不确定性理论的阶跃式发展。

5 结语

本文深入分析了产品结构设计过程中的各种不确定现象,针对多粒度模糊不确定下质量特性精准提

取、随机不确定下功能结构模块化求解、不完备区间不确定下结构方案多属性决策以及高维混合不确定下关键结构可靠性优化等技术进行了系统研究,构建了不确定视角下产品结构性能优化设计技术体系,展望了产品结构性能优化设计的未来研究方向,主要研究成果与创新点在于:(1)提出了多粒度模糊不确定下基于逻辑相似的产品质量特性精准提取技术,该技术解决了客户需求数据集结过程中客户重要度分配不合理等问题,能够精准提取产品质量特性,从而进一步明确产品的质量功能要求,为优化产品性能打下良好基础;(2)提出了随机不确定下基于性能均衡的产品功能结构模块化求解技术。该技术解决了在产品功能结构模块化求解过程中无法全面兼顾耦合关联、随机因素与性能均衡的问题,实现了产品功能结构模块化求解从依赖人为主观判断到主观数据与客观数据兼顾、从侧重配置性能满足到多方面性能均衡的良性转变,能够有效优化产品性能;(3)提出了不完备区间不确定下基于属性约简的产品结构方案多属性决策技术。该技术解决了产品结构方案决策中因需要考虑的属性繁多而造成的计算量大、因认知不充分而造成的决策数据中区间不确定性与不完备性共存等困难,决策结果可信并具有较强稳定性,有助于以较高效率准确选择最佳产品结构方案,从而有效改善产品性能;(4)提出了高维混合不确定下基于降维积分的产品关键结构可靠性优化技术。该技术有效减小了高维混合不确定下产品关键结构可靠性优化过程的计算量,有助于在保证产品可靠性的前提下进一步优化产品性能。

参考文献:

- [1] Ozer M. Factors Which Influence Decision Making in New Product Evaluation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 163(3): 784-801.
- [2] 谭建荣. 机电产品现代设计: 理论、方法与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
TAN Jian-rong. *Modern Design of Mechanical Products: Theory, Method and Technology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [3] 闻邦椿, 周知承, 韩清凯, 等. 现代机械产品设计与新产品开发中的重要作用——兼论面向产品总体质量的“动态优化、智能化和可视化”三化综合设计法[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(10): 43-52.
WEN Bang-chun, ZHOU Zhi-cheng, HAN Qing-kai, et al. Important Role of Products Design of Modern Machinery in the Research Machinery and Development of New Products: Study On the Threefold Syntesis Method “Dynamic Design, Intelligent Design and Partial Virtual Design” Face to Products Generalization Quality[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(10): 43-52.
- [4] 闻邦椿. 产品设计理论与方法的发展趋向及产品的现

- 代设计[J]. 机电工程, 2011, 28(3): 255-259.
- WEN Bang-chun. Development Trend of Product Design Theory and Method and Modern Design of Products [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2011, 28(3): 255-259.
- [5] 闻邦椿. 产品全功能与全性能的综合设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- WEN Bang-chun. Comprehensive Design of Full Function and Full Performance of Products[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2008.
- [6] 王华敏, 秦国华, 胡政, 等. 面向加工变形控制的航空整体结构件拓扑优化设计方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 127-138.
- WANG Hua-min, QIN Guo-hua, HU zheng, et al. A Structural Topology Optimal Design Approach to Machining Deformation Control for Aeronautical Monolithic Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 127-138.
- [7] Sun G Y, Zhang H L, Fang J G, et al. Multi-objective and Multi-case Reliability-based Design Optimization for Tailor Rolled Blank (TRB) Structures[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2017, 55(5): 1899-1916.
- [8] Cheng L, Bai J X, To A C. Functionally Graded Lattice Structure Topology Optimization for the Design of Additive Manufactured Components with Stress Constraints[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 344: 334-359.
- [9] Liu Y, Zhang Z R, Wang C, et al. Optimization and Performance Improvement of A Hybrid Excitation Synchronous Machine with Modular Magnetic-shunting Rotor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4381-4390.
- [10] 吴新燕, 关富玲. 双圈六面体环形桁架式可展开天线结构设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 218-225.
- WU Xin-yan, GUAN Fu-ling. Design of Deployable Antenna of Double-loop Hexahedron Truss[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 218-225.
- [11] 林秋红, 张骞, 贾文文, 等. 大型空间薄膜遮阳罩折展构型设计与分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 13-20.
- LIN Qiu-hong, ZHANG Qian, JIA Wen-wen, et al. Deployable Configuration Design and Analysis of Large Space Membrane Sunshield Structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 13-20.
- [12] 赵福群, 郭盛, 曲海波, 等. 空间多臂机构折展性及其结构配置设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5): 133-140.
- ZHAO Fu-qun, GUO Sheng, QU Hai-bo, et al. Design of Deployable Space Multiple-arm Mechanism and Its Structure Configuration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 133-140.
- [13] Deng X, Jiang W. An Evidential Axiomatic Design Approach for Decision Making Using the Evaluation of Belief Structure Satisfaction to Uncertain Target Values [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2018, 33(1): 15-32.
- [14] Stieng L E S, Muskulus M. Reliability-based Design Optimization of Offshore Wind Turbine Support Structures Using Analytical Sensitivities and Factorized Uncertainty Modeling[J]. Wind Energy Science, 2020, 5(1): 171-198.
- [15] 郑浩, 冯毅雄, 高一聪, 等. 基于性能演化的复杂产品概念设计求解过程研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 214-223.
- ZHENG Hao, FENG Yi-xiong, GAO Yi-cong, et al. The Solving Process of Conceptual Design for Complex Product Based on Performance Evolution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 214-223.
- [16] 张根保, 曾海峰, 王国强, 等. 复杂机电产品质量特性解耦模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 7-15.
- ZHANG Gen-bao, ZENG Hai-feng, WANG Guo-qiang, et al. Decoupling Model of Quality Characteristics of Complex Electromechanical Products[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 7-15.
- [17] 张根保, 纪富义, 任显林, 等. 复杂机电产品关键质量特性提取模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(2): 8-14.
- ZHANG Gen-bao, JI Fu-yi, REN Xian-lin, et al. Key Quality Characteristics Extraction Model of Complicated Mechanical and Electrical Products[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(2): 8-14.
- [18] Sanderson D, Chaplin J C, Ratchev S. A Function-Behaviour-Structure Design Methodology for Adaptive Production Systems[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(9): 3731-3742.
- [19] Ayag Z. An Integrated Approach to Evaluating Conceptual Design Alternatives in A New Product Development Environment[J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(4): 687-713.
- [20] Zhu J H, Zhang W H, Xia L. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2016, 23(4): 595-622.
- [21] Jiang H, Kwong C K, Kremer G E, et al. Dynamic Modelling of Customer Preferences for Product Design Using Denfis and Opinion Mining[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 42: 100969.
- [22] 高一聪. 面向关键质量特性的大型注塑装备保质设计技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- GAO Yi-cong. Research on Technology and Application of Design for Quality of Large Scale Injection Moulding Equipment Oriented to Key Quality Characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [23] Krishnapillai R, Zeid A. Mapping Product Design Specification for Mass Customization[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(1): 29-43.
- [24] Wang H, Fang Z, Wang D, et al. An Integrated Fuzzy QFD and Grey Decision-making Approach for Supply Chain Collaborative Quality Design of Large Complex Products[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106212.

- [25] Jin J, Ji P, Liu Y, et al. Translating Online Customer Opinions into Engineering Characteristics in QFD: A Probabilistic Language Analysis Approach[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2015, 41: 115-127.
- [26] Jin J, Liu Y, Ji P, et al. Understanding Big Consumer Opinion Data for Market-driven Product Design[J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(10): 3019-3041.
- [27] Li S, Tang D, Wang Q. Rating Engineering Characteristics in Open Design Using A Probabilistic Language Method Based on Fuzzy QFD[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135: 348-358.
- [28] He Y H, Tang X Q, Chang W B. Technical Decomposition Approach of Critical to Quality Characteristics for Product Design for Six Sigma[J]. *Quality & Reliability Engineering International*, 2010, 26(4): 325-339.
- [29] 戴伟, 唐晓青. 基于质量特性的产品质量策划模型及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(10): 1938-1945.
DAI Wei, TANG Xiao-qing. Quality Planning Model Based on Quality Characteristics and Its Application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(10): 1938-1945.
- [30] 何益海, 唐晓青. 基于关键质量特性的产品保质设计[J]. *航空学报*, 2007(6): 1468-1481.
HE Yi-hai, TANG Xiao-qing. Design for Quality Based on Product Key Quality Characteristics[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2007(6): 1468-1481.
- [31] 张根保, 金传喜, 冉琰, 等. 基于 FMA 分解的关键质量特性映射变换技术[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(3): 1-14.
ZHANG Gen-bao, JIN Chuan-xi, RAN Yan, et al. Mapping Technique of Key Quality Characteristics Based on FMA Decomposition[J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(3): 1-14.
- [32] 庞继红, 张根保, 周宏明, 等. 基于粗糙集数控机床精度设计质量特性反向映射研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(5): 101-107.
PANG Ji-hong, ZHANG Gen-bao, ZHOU Hong-ming, et al. Study on Reverse Mapping of Accuracy Design Quality Characteristics for Numerical Control Machine Based on Rough Set[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(5): 101-107.
- [33] 张根保, 庞继红, 任显林, 等. 机械产品多元质量特性重要度排序方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(1): 151-158.
ZHANG Gen-bao, PANG Ji-hong, REN Xian-lin, et al. Importance Sorting Method for Multiple Quality Characteristics of Mechanical Product[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(1): 151-158.
- [34] 安相华, 冯毅雄, 谭建荣. 基于 DEMATEL 和 Choquet 积分的质量特性映射方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(9): 1887-1896.
AN Xiang-hua, FENG Yi-xiong, TAN Jian-rong. Quality Characteristics Mapping Method Based on DEMATEL and Choquet Integral[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(9): 1887-1896.
- [35] Ameli M, Mansour S, Ahmadi-Javid A. A Simulation-optimization Model for Sustainable Product Design and Efficient End-of-life Management Based on Individual Producer Responsibility[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 140: 246-258.
- [36] Piroozfar P, Farr E R P, Hvam L, et al. Configuration Platform for Customisation of Design, Manufacturing and Assembly Processes of Building Facade Systems: A Building Information Modelling Perspective[J]. *Automation in Construction*, 2019, 106: 102914.
- [37] Zeballos L J, Mendez C A, Poveda A P B. Mixed-integer Linear Programming Approach for Product Design for Life-cycle Profit[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 137: 106079.
- [38] Gero J S, Kannengiesser U. The Situated Function-behaviour-structure Framework[J]. *Design Studies*, 2004, 25(4): 373-391.
- [39] Gero J S. Computational Models of Innovative and Creative Design Processes[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2000, 64(2): 183-196.
- [40] Suh N P. Axiomatic Design of Mechanical Systems[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1995, 117: 2-10.
- [41] Russo D, Spreafico C. TRIZ 40 Inventive Principles Classification through FBS Ontology[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 131: 737-746.
- [42] 谢友柏. 论设计科学[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(7): 873-880.
XIE You-bai. Design Science[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(7): 873-880.
- [43] 王莉静, 檀润华, 郝涛. 不确定用户驱动的产品定制设计参数映射模型[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(17): 2346-2351.
WANG Li-jing, TAN Run-hua, XI Tao. Mapping Model of Design Parameters in Product Customization Driven by Uncertain Users[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(17): 2346-2351.
- [44] 刘伟, 曹国忠, 檀润华, 等. 基于产品基因与物理表达的变型设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(2): 381-391.
LIU Wei, CAO Guo-zhong, TAN Run-hua, et al. Variant Design Based on Product Gene and Physical Description[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(2): 381-391.
- [45] 梁瑞, 张建辉, 檀润华, 等. 已有产品功能创新设计过程模型及应用[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 50-61.
LIANG Rui, ZHANG Jian-hui, TAN Run-hua, et al. Design Process Model and Application of the Existing Product Function Innovation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 50-61.
- [46] 李超, 李文强, 李彦. 基于核心功能约束的概念设计方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2018(10): 16-

19.
LI Chao, LI Wen-qiang, LI Yan. Conceptual Design Method Based on Core Function Constraints[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(10): 16-19.
- [47] 孙龙, 李彦. 基于功能结构元组的技术文档的特征提取研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(5): 12-16.
SUN long, LI Yan. Conceptual Design Method Based on Core Functional Constraint[J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(5): 12-16.
- [48] 金熙哲, 郭为忠, 高峰, 等. 机构系统概念设计中功能到行为的映射方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(1): 157-160.
JIN Xi-zhe, GUO Wei-zhong, GAO Feng, et al. A Method to Map Functions to Behaviors in Conceptual Design of Mechanism System[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(1): 157-160.
- [49] 金熙哲, 郭为忠, 高峰, 等. 机构系统概念设计中行为到机构的映射方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(4): 638-642.
JIN Xi-zhe, GUO Wei-zhong, GAO Feng, et al. A Method to Map Behaviors to Mechanisms in Conceptual Design of Mechanism System[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(4): 638-642.
- [50] 谢清. 定制产品功能-结构映射原理、方法及关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
XIE Qing. Research on Theories, Methods and Key Technologies of Mapping Between Function Domain and Structure Domain for Customization Products[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [51] 林晓华. 面向设计—制造—服役全周期的产品质量控制与优化技术及其在大型空分装备中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
LIN Xiao-hua. Product Quality Control and Optimization Technology Oriented to Design-manufacturing Service Full Cycle and Application in Large Air Separation Equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [52] Kang Y, Tang D. Matrix-based Computational Conceptual Design with Ant Colony Optimisation[J]. Journal of Engineering Design, 2013, 24(6): 429-452.
- [53] 康与云, 唐敦兵. 基于矩阵算式和蚁群算法的元功能链设计方案优化方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(23): 25-33.
KANG Yu-yun, TANG Dun-bing. An Optimization Method for Meta-functional Chain Design Solution Based on Computational Matrix and Ant Colony Algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(23): 25-33.
- [54] 冯培恩, 杨超, 邱清盈, 等. 多对称机械系统的功能设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(23): 1-16.
FENG Pei-en, YANG Chao, QIU Qing-ying, et al. Research on Functional Design of Multi-symmetry Mechanical System[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(23): 1-16.
- [55] 钟掘, 段吉安. 现代复杂工业制造系统的若干设计理论问题[J]. 机械工程学报, 2001, 37(12): 1-6.
ZHONG Jue, DUAN Ji-an. Several Design Problems for Modern Industrial Manufacturing System[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(12): 1-6
- [56] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
ZHONG Jue. Coupling Design Theory and Method of Complex Electromechanical System[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 2007.
- [57] 刘振宇, 周思杭, 谭建荣, 等. 基于多准则修正的产品性能多参数关联分析与预测方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 105-114.
LIU Zhen-yu, ZHOU Si-hang, TAN Jian-rong, et al. Multiple Parameters Correlation Analysis and Prediction Method of Product Performance Based on Multi-criteria Modification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 105-114.
- [58] Khalaf R E, Agard B, Penz B. Module Selection and Supply Chain Optimization for Customized Product Families Using Redundancy and Standardization[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(1): 118-129.
- [59] Badurdeen F, Aydin R, Brown A. A Multiple Lifecycle-based Approach to Sustainable Product Configuration Design[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 200: 756-769.
- [60] Li Z K, Pehlken A, Qian H T, et al. A Systematic Adaptable Platform Architecture Design Methodology for Early Product Development[J]. Journal of Engineering Design, 2016, 27(1): 93-117.
- [61] Zheng P, Xu X, Yu S, et al. Personalized Product Configuration Framework in An Adaptable Open Architecture Product Platform[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 422-435.
- [62] Dou R, Huang R, Nan G, et al. Less Diversity but Higher Satisfaction: An Intelligent Product Configuration Method for Type-decreased Mass Customization[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106336.
- [63] Dou R, Zhang Y, Nan G. Application of Combined Kano Model and Interactive Genetic Algorithm for Product Customization[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(7): 2587-2602.
- [64] Wei W, Fan W, Li Z. Multi-objective Optimization and Evaluation Method of Modular Product Configuration Design Scheme[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(9): 1527-1536.
- [65] Chen Y L, Peng Q J, Gu P H. Methods and Tools for the Optimal Adaptable Design of Open-architecture Products[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(4): 991-1008.
- [66] 顾佩华, 胡崇淋, 彭庆金. 开放式结构产品的模块规划[J]. 工程设计学报, 2014, 21(2): 129-139.
GU Pei-hua, HU Chong-lin, PENG Qing-jin. Module Planning for Open Architecture Product[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2014, 21(2): 129-139.

- [67] 崔文华, 刘晓冰, 王伟, 等. 基于递阶支持向量机的产品族配置性能预测[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(8): 2000-2006.
CUI Wen-hua, LIU Xiao-bing, WANG Wei, et al. Configuration Performance Predication Method of Product Family Based on Hierarchical Support Vector Machine [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(8): 2000-2006.
- [68] 崔文华, 刘晓冰, 王伟, 等. 改进混合蛙跳算法优化的产品族模糊C均值聚类设计方法[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(5): 760-765.
CUI Wen-hua, LIU Xiao-bing, WANG Wei, et al. Product Family Design Method Based on Fuzzy C-means Clustering Method Optimized by Improved Shuffled Frog Leaping Algorithm[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(5): 760-765.
- [69] 肖人彬, 程贤福, 陈诚, 等. 基于公理设计和设计关联矩阵的产品平台设计新方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 94-103.
XIAO Ren-bin, CHENG Xian-fu, CHEN Cheng, et al. New Approach to Product Platform Design Based on Axiomatic Design and Design Relationship Matrix[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 94-103.
- [70] 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.
- [71] 侯亮, 王浩伦, 穆瑞, 等. 模块化产品族演进创新方法研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 55-64.
HOU Liang, WANG Hao-lun, MU Rui, et al. Research on the Evolution & Innovation for Modular Product Family[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(11): 55-64.
- [72] Tian G D, Zhou M C, Chu J W, et al. Probability Evaluation Models of Product Disassembly Cost Subject to Random Removal Time and Different Removal Labor Cost[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(2): 288-295.
- [73] Jang H A, Min S. Time-dependent Probabilistic Approach of Failure Mode and Effect Analysis[J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9(22): 1-16.
- [74] 祁凌云. FDQ 复杂系统维修性管理与综合评价方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
QI Ling-yun. Research on Maintainability Management and Comprehensive Evaluation Method of FDQ Complex System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2012.
- [75] 吴茂坤. 基于可靠性分析的数控组合机床维修时间设计[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
WU Mao-kun. Design of Maintenance Time for CNC Modular Machine Tool Based on Reliability Analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [76] 杨新宇, 胡业发. 不确定环境下复杂产品维护、维修和大修服务资源调度优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(5): 852-861.
YANG Xin-yu, HU Ye-fa. Maintenance, Repair and Overhaul/Operations Service Resource Scheduling Optimization for Complex Products in Uncertain Environment[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(5): 852-861.
- [77] Jing L T, Peng X, Li J Q, et al. A Decision Approach with Multiple Interactive Qualitative Objectives for Product Conceptual Schemes Based on Noncooperative-cooperative Game Theory[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 38: 581-592.
- [78] Parreiras R O, Ekel P Y, Martini J S C, et al. A Flexible Consensus Scheme for Multicriteria Group Decision Making under Linguistic Assessments[J]. Information Sciences, 2010, 180(7): 1075-1089.
- [79] Yang Y, Yuan G, Zhuang Q, et al. Multi-objective Low-carbon Disassembly Line Balancing for Agricultural Machinery Using MDFOA and Fuzzy AHP[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 1465-1474.
- [80] Tian G, Zhang H, Feng Y, et al. Green Decoration Materials Selection under Interior Environment Characteristics: A Grey-correlation Based Hybrid MCDM Method [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 682-692.
- [81] Tian G D, Liu X, Zhang M H, et al. Selection of Take-back Pattern of Vehicle Reverse Logistics in China via Grey-DEMATEL and Fuzzy-VIKOR Combined Method [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 1088-1100.
- [82] Kacprzak D. An Extended TOPSIS Method Based on Ordered Fuzzy Numbers for Group Decision Making[J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(3): 2099-2129.
- [83] Fu Y P, Wang H F, Tian G D, et al. Two-agent Stochastic Flow Shop Deteriorating Scheduling via A Hybrid Multi-objective Evolutionary Algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(5): 2257-2272.
- [84] Benitez P, Rocha E, Varum H, et al. A Dynamic Multi-criteria Decision-making Model for the Maintenance Planning of Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 27: 100971.
- [85] Zoran S, Dragisa S, Igor M, et al. Application of MCDM Methods for Flotation Machine Selection[J]. Minerals Engineering, 2019, 137: 140-146.
- [86] Mian S H, Al-Ahmari A. Comparative Analysis of Different Digitization Systems and Selection of Best Alternative[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 30(5): 2039-2067.
- [87] Cheng J, Zhang Y Y, Feng Y X, et al. Structural Optimization of A High-speed Press Considering Multi-source Uncertainties Based on A New Heterogeneous TOPSIS [J]. Applied Sciences, 2018, 8(1): 1-14.
- [88] 孟祥慧, 谢友柏, 戴旭东. 面向复杂产品时变性能设计的理论与方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 128-133.
MENG Xiang-hui, XIE You-bai, DAI Xu-dong. Meth-

- odology of Designing for Time-varying Performance of Complex Products[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 128-133.
- [89] 张彬彬, 王立平, 吴军. 3 自由度并联机构的动力学各向同性评价方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(8): 803-809.
- ZHANG Bin-bin, WANG Li-ping, WU Jun. Dynamic Isotropic Performance Evaluation of a 3-DOF Parallel Manipulator[J]. *J Tsinghua Univ (Sci & Technol)*, 2017, 57(8): 803-809.
- [90] 王立平, 张彬彬, 吴军. 基于最小二乘法的电主轴回转精度评价[J]. *制造技术与机床*, 2018(2): 54-60.
- WANG Li-ping, ZHANG Bin-bin, WU Jun. Rotation Accuracy Evaluation of Electric Spindle Based on Least Square Method[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2018(2): 54-60.
- [91] 杨涛, 杨育, 张雪峰, 等. 基于客户聚类分析的产品概念设计方案评价决策方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(7): 1669-1678.
- YANG Tao, YANG Yu, ZHANG Xue-feng, et al. Schemes Evaluation and Decision Methods of Product Conceptual Design Based on Customer Clustering Analysis[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(7): 1669-1678.
- [92] 杨涛, 杨育, 张东东. 考虑客户需求偏好的产品创新概念设计方案生成[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 875-884.
- YANG Tao, YANG Yu, ZHANG Dong-dong. Generation of Product Innovation Conceptual Design Schemes for Considering the Demand Preferences of Customers[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(4): 875-884.
- [93] 陈健, 莫蓉, 余隋怀, 等. 云环境下众包产品造型设计方案多目标群体决策[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(8): 1517-1524.
- CHEN Jian, MO Rong, YU Sui-huai, et al. Multi-objective Group Decision Method for Crowdsourcing Product Modeling Design Scheme in Cloud Environment[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(8): 1517-1524.
- [94] 吴扬东, 张太华, 刘丹, 等. 复杂产品设计方案的数据驱动多属性优化决策[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(7): 865-870.
- WU Yang-dong, ZHANG Tai-hua, LIU Dan, et al. Data-driven Multi-attribute Optimization Decision-making for Complex Product Design Schemes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(7): 865-870.
- [95] 孟广伟, 冯昕宇, 周立明, 等. 基于降维算法的结构混合可靠性分析方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(8): 1944-1949.
- MENG Guang-wei, FENG Xin-yu, ZHOU Li-ming, et al. Hybrid Structural Reliability Analysis Method Based on Dimension Reduction Algorithm[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(8): 1944-1949.
- [96] 嵇明. 帽形截面耐撞薄壁结构的棱边强化与优化设计[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(20): 178-187.
- JI Ming. Ridgeline Strengthening and Optimization of Thin-walled Hat-section for Crashworthiness Structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20): 178-187.
- [97] 中国机械工程学会. 2016-2017 机械工程学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
- Chinese Mechanical Engineering Society. 2016-2017 Report on Advances in Mechanical Design[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2018.
- [98] Zhou M D, Lazarov B S, Sigmund O. Topology Optimization for Optical Microlithography with Partially Coherent Illumination[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2017, 109(5): 631-647.
- [99] Lee H A, Park G J. Nonlinear Dynamic Response Topology Optimization Using the Equivalent Static Loads Method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, 283: 956-970.
- [100] Goo S, Wang S, Hyun J, et al. Topology Optimization of Thin Plate Structures with Bending Stress Constraints[J]. *Computers & Structures*, 2016, 175: 134-143.
- [101] Luo Y J, Wang M Y, Kang Z. Topology Optimization of Geometrically Nonlinear Structures Based on An Additive Hyperelasticity Technique[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, 286: 422-441.
- [102] 张卫红, 郭文杰, 朱继宏. 部件级多组件结构系统的整体式拓扑布局优化[J]. *航空学报*, 2015, 36(8): 2662-2669.
- ZHANG Wei-hong, GUO Wen-jie, ZHU Ji-hong. Integrated Layout and Topology Optimization Design of Multi-component Systems with Assembly Units[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2015, 36(8): 2662-2669.
- [103] 刘成颖, 谭锋, 王立平, 等. 面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(3): 161-168.
- LIU Cheng-ying, TAN Feng, WANG Li-ping, et al. Research on Optimization of Column Structure Design for Dynamic Performance of Machine Tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 161-168.
- [104] 张宪民, 胡凯, 王念峰, 等. 基于并行策略的多材料柔顺机构多目标拓扑优化[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(19): 1-8.
- ZHANG Xian-min, HU Kai, WANG Nian-feng, et al. Multi-objective Topology Optimization of Multiple Materials Compliant Mechanisms Based on Parallel Strategy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(19): 1-8.
- [105] Zhu B L, Zhang X M, Wang N F. Topology Optimization of Hinge-free Compliant Mechanisms with Multiple Outputs Using Level Set Method[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 47(5): 659-672.
- [106] Garambois P, Besset S, Jezequel L. Multi-objective Str-

- uctural Robust Optimization under Stress Criteria Based on Mixed Plate Super-elements and Genetic Algorithms[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53(2): 205-213.
- [107] Sun G Y, Fang J G, Tian X Y. Discrete Robust Optimization Algorithm Based on Taguchi Method for Structural Crashworthiness Design[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(9): 4482-4492.
- [108] Cheng J, Qian Y M, Liu Z Y, et al. Heterogeneous-objective Robust Optimization of Complex Mechatronic Components Considering Interval Uncertainties[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 20538-20552.
- [109] Cheng J, Liu Z Y, Qian Y M, et al. Non-probabilistic Robust Equilibrium Optimization of Complex Uncertain Structures[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2020, 142(2): 1-15.
- [110] Cheng J, Liu Z Y, Qian Y M. Robust Optimization of Uncertain Structures Based on Interval Closeness Coefficients and the 3D Violation Vectors of Interval Constraints[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 60(1): 17-33.
- [111] Wang M R, Fan J P, Hu J. A Non-probabilistic Reliability-based Design Optimization Method for Structures Based on Interval Models[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, 41(2): 425-439.
- [112] Lin C, Gao F L, Bai Y C. Multiobjective Reliability-based Design Optimisation for Front Structure of An Electric Vehicle Using Hybrid Metamodel Accuracy Improvement Strategy-based Probabilistic Sufficiency Factor Method[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2018, 23(3): 290-301.
- [113] 张义民, 孙志礼. 机械产品的可靠性大纲[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(14): 14-20.
ZHANG Yi-min, SUN Zhi-li. The Reliability Syllabus of Mechanical Products [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(14): 14-20.
- [114] 于繁华, 刘仁云, 张义民, 等. 机械结构动态可靠性设计的智能计算方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(4): 1269-1275.
YU Fan-hua, LIU Ren-yun, ZHANG Yi-min, et al. Intelligent Algorithm for Optimized Dynamic Reliability Design of Mechanic Structure[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, 46(4): 1269-1275.
- [115] 杨周, 姜超, 张义民, 等. 采煤机截割部扭矩轴的动态可靠性分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 217-222.
YANG Zhou, JIANG Chao, ZHANG Yi-min, et al. Dynamic Reliability Analysis of Torque Shaft in Cutting Part of Coal Mining Machines[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(2): 217-222.
- [116] 周笛, 张旭方, 张义民. 采煤机牵引部可靠性灵敏度分析及优化设计[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(1): 81-85.
ZHOU Di, ZHANG Xu-fang, ZHANG Yi-min. Reliability Sensitivity Analysis and Optimization Design on Tractive Drive System of Shearer Loader[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(1): 81-85.
- [117] 丁启程, 王伟, 姜忠, 等. 五轴机床 RTCP 检测的轨迹生成与性能比较[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(20): 116-127.
DING Qi-cheng, WANG Wei, JIANG Zhong, et al. Comparison of the Generating Method and Detecting Ability of RTCP Trajectories for Five-axis CNC Machine Tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20): 116-127.
- [118] 张云, 于广, 王立平, 等. 基于性能退化数据的数控转台单子样可靠性分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(4): 299-305.
ZHANG Yun, YU Guang, WANG Li-ping, et al. Performance Degradation Data Based NC Rotary Table Reliability Predictions Using a Single Sample[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science)*, 2020, 60(4): 299-305.
- [119] 张云, 姜楠, 王立平. 基于 Wiener 过程的数控转台极小子样可靠性分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(2): 91-95.
ZHANG Yun, JIANG Nan, WANG Li-ping. Reliability Analysis of NC Rotary Table Based on Wiener Process for Extremely Small Samples[J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science)*, 2019, 59(2): 91-95.
- [120] 姜潮, 张旺, 韩旭. 基于 Copula 函数的证据理论相关性分析模型及结构可靠性计算方法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(16): 199-209.
JIANG Chao, ZHANG Wang, HAN Xu. A Copula Function Based Evidence Theory Model for Correlation Analysis and Corresponding Structural Reliability Method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(16): 199-209.
- [121] 吉猛, 姜潮, 韩硕. 一种基于同伦分析的结构可靠性功能度量法[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(2): 149-153.
JI Meng, JIANG Chao, HAN Shuo. An Performance Measure Approach of Structural Reliability Based on Homotopy Analysis[J]. *Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(2): 149-153.
- [122] Huang Z L, Jiang C, Li X M, et al. A Single-loop Approach for Time-variant Reliability-based Design Optimization[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2017, 66(3): 651-661.
- [123] Li B, Yang Y, Su J, et al. Two-sided Matching Model for Complex Product Manufacturing Tasks Based on Dual Hesitant Fuzzy Preference Information[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 186: 104989.