

数字化智能化产品设计方法与技术的发展

刘继红

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 回顾产品设计方法与技术的发展经历, 建立设计方法与技术的定式化分类框架, 分析数字化智能化产品设计技术的研究与应用热点, 展望智能化创新设计技术的未来发展趋势与挑战。**方法** 通过对已有的产品设计方法与技术分析, 将设计对象、设计阶段、设计资源、设计手段作为设计方法与技术的分类要素, 构建设计方法与技术的定式化分类框架; 通过确定各分类要素的具体内容, 可以明确不同的设计方法与技术, 如数字化智能化产品设计技术; 利用该定式化分类框架, 展望未来数字化智能化产品设计技术的发展趋势。**结论** 提出了一种用于产品设计方法与技术定式化的分类框架, 界定了基于模型的系统设计与仿真优化、基于互联网的开放式众包设计和数据驱动的设计等三个热点研究方向, 指出了产品全生命周期一体化设计、混合智能驱动的创新设计的趋势与挑战。

关键词: 设计方法与技术; 数字化设计; 智能化设计; 数据/模型/知识

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0027-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.003

Development for Digitalized and Intelligent Product Design

LIU Ji-hong

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The work aims to retrospect the historical development of product design methods and techniques, establish a formalized classification framework for design methods and techniques, analyze several research and application hot-spots of digitalized and intelligent product design techniques and prospect the future development trends and challenges of intelligent and innovative design techniques. In this work, by analyzing the existed design methods and techniques, design object, design phase, design resource, and design means were extracted as classification elements to construct a formalized classification framework for design methods and techniques. Different design methods and techniques, including the digitalized and intelligent product design techniques, were depicted by determining the specific contents of each classification element. As well, the future development trend for the digitalized and intelligent product design techniques was discussed with the formalized classification framework. In summary, a classification framework for formalizing product design methods and techniques is proposed, with which three hot research directions are revealed: model-based system design and simulation optimization, Internet-based open crowdsourcing design, and data-driven design. The trends and challenges of integrated product lifecycle design and hybrid-intelligence driven innovative design are pointed out.

KEY WORDS: design method and technique; digitalized design; intelligent design; data/model/knowledge

人类进入手工业以及工业社会之后, 越来越多的生产工具面世并用于生产领域, 也创造出更多的产品, 产品设计成为改造自然的基本生产活动, 人类通过制造各种工具和产品来满足自身的需求。特别是进

入工业社会后, 依赖人力和畜力的生产被机器生产所替代, 业务分工更为细化和链条化, 更复杂更新的产品不断面世, 产品设计的作用愈加重要。产品设计或产品研发设计是产品全生命周期的上游阶段, 将市场

收稿日期: 2022-11-30

作者简介: 刘继红 (1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂产品数字化设计与制造、知识工程与知识管理、智能制造与工业互联网。

和用户的意愿与需求转换为可实现的、详细的明确定义,为生产制造提供必要的信息和依据,是现代企业市场竞争的主战场^[1]。产品设计影响着整个产品制造60%~85%的成本,而且占据着制造产业链微笑曲线高附加值的一端。

产品设计是需要设计人员进行大量决策和判断的、高度知识密集的、创造性的智力活动^[2],必须完成大量的设计思考、设计计算以及产生设计文档等工作。产品设计也是多学科多领域的综合性活动,需要考虑技术性、经济性、社会性、艺术性等方面甚至在矛盾的约束条件下,确定满足人类和社会需求的产品方案和产品信息。产品设计已经成为单凭设计人员个人直觉和经验无法完成的、需要通过有效的设计方法和技术乃至工具才能完成的复杂任务。

产品设计方法和技术在不断丰富和发展。设计方法被认为是设计方式、设计流程或辅助设计工具。设计方法是标准化的设计步骤,也是外显化的设计想法、设计思路^[3]。世界知识产权组织将所有能带来经济效益的科学知识都定义为技术,那么设计技术就是解决设计问题的、经过学习和实践积累的知识、经验、技巧和手段。设计方法和设计技术有区别,前者指设计途径和思路,后者指设计技巧和能力。但是,两者也可以相提并论,甚至设计方法最终可以转成设计技

术。例如,多学科设计优化方法明确了多学科优化问题的解决思路 and 流程,但是一旦该方法借助计算机技术得以实现形成多学科设计优化系统,那么方法也便成为了多学科设计优化技术。总体上,越来越多的产品设计方法最终将实现技术化。本文并不刻意区分设计方法和技术,统称为产品设计方法和技术(DMT, Design Method and Technique)。

本文通过对已有产品设计方法与技术的回顾介绍,提出一个产品设计方法与技术的定式化分类框架。通过该定式化分类框架,分析数字化智能化产品设计方法与技术的热点研究方向,并展望智能化创新设计技术未来发展的趋势与挑战。

1 产品设计方法与技术的发展回顾

产品设计方法与技术涉及的最基本的两个因素是设计对象和设计过程(或行为)。针对设计对象的设计方法与技术,重点研究设计对象的功能原理和结构形态,而针对设计过程或行为的设计方法与技术则关注设计人员解决问题的思维活动。另外还有计算机信息技术也深刻影响了产品设计方法与技术的发展。产品设计方法与技术的大致发展历程如图1所示。

图1明确描述了产品设计方法与技术的发展两条发

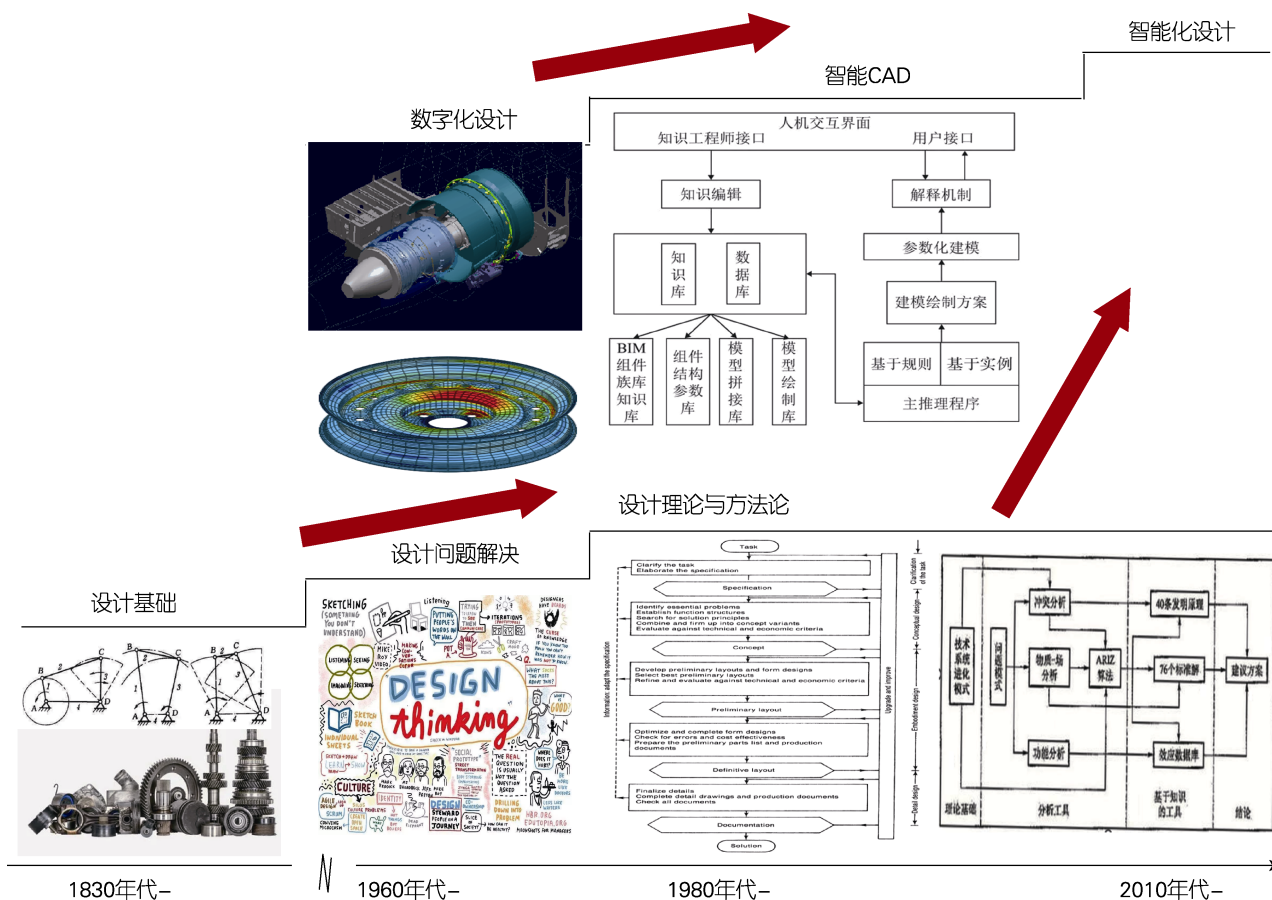


图1 产品设计方法与技术的发展历程

Fig.1 Progression of product design methods and techniques

展线。一是设计方法线,从机械基础零件和机构的设计方法到关注设计人员智能活动的设计问题解决方法,再到综合设计对象、设计思维、设计业务和设计过程的设计理论和方法论;二是计算机等信息技术带动的设计技术线,从数字化设计技术到智能 CAD 技术,再到智能设计技术。实际上还有第三条线,即设计方法向设计技术转换的发展线。

1.1 设计基础方法

第一次工业革命之后,蒸汽驱动的机器面世。新发明的机器由大量基础通用的机械零件构成,通过机构运动实现机器功能。由此带动了以基础零件和机构为对象的设计基础方法的研究。英国 Willis^[4]在其 1841 年出版的《机构原理》(The Principles of Mechanism)一书中明确指出,机构运动是任何机械的核心原理。德国 Reuleaux 在其《理论运动学》(Theoretische Kinematik, 1875 年)一书中进一步发展了机构学,对凸轮、棘轮、带传动等机构的运动进行了系统的分析。1877 年,英国 Unwin^[5]的著作《The Elements of Machine Design》系统介绍了机械零件的设计方法。设计基础方法的研究奠定了机械产品设计的基础,也成为机械类专业的基础课程。

1.2 设计问题解决方法

第二次世界大战结束时,战后重建、经济复兴对工业快速发展提出了迫切要求。设计方法也得到了广泛关注。1962 年,在伦敦举行了第一届设计方法会议,主要围绕系统设计方法研究,探讨了设计过程全面管理的系统方法和可用于设计过程的系统技术,如运筹学、质量管理、价值工程等研究成果,这些系统技术就是在二战期间被提出和发展的。1968 年,在美国 MIT 举行了“环境设计与规划中的新方法”会议,着重探讨了设计的复杂性问题,理解设计者如何用传统的设计方法解决设计问题。这一时期,大量创造论、设计论,以及工程设计的著作面世。例如,《Introduction to Design》(M.Asimov, 1962 年)、《Design Engineering》(J.R.Dixon, 1966 年)、《设计论 I, II, III》(渡边茂, 1968 年)等。在欧洲设计研究组织 WDK 的组织下,1981 年在意大利罗马举行了第一届国际工程设计会议 ICED (International Conference on Engineering Design)。之后,其成为了主要在欧洲举行的设计研究交流盛会。

创造论、心理学、认知科学等也促进了融合逻辑思维、形象思维、联想思维和创新思维等的设计创新思维方法的发展,形成了头脑风暴法、635 法、特尔斐法等群智设计方法,系统提问、检查表等设计探索方法,属性列举、优缺点列举等设计列举法,简单联想、仿生联想等设计联想法以及逆向思维法和组合创新法等^[6]。Hanington 等^[7]汇集并介绍了用于研究复杂问题、开拓创新想法和有效解决问题的 100 种通用设

计方法,其中包括头脑风暴、案例研究、访谈、文献综述、故事板、概念图、认知图、价值分析等方法,各自适用于设计规划、设计分析、设计探索、设计评估和设计验证等环节。Cross^[3]针对产品设计各环节确定了相应的设计方法,包括用户场景法(确认产品机会)、目标树法(明确设计目标)、功能分析法(确定产品功能)、性能规格分析法(设置产品需求)、质量功能分析法(明确产品特性)、形态学图表法(生成候选方案)、目标加权法(评估候选方案)和价值工程法(细节优化完善)。

1.3 设计理论与方法论

设计问题解决方法聚焦于不同设计阶段不同设计任务需要的解决办法,并不满足越来越复杂的产品总体设计的需要,同时对设计本身的认识仍然停留在浅层次。20 世纪 80 年代开始,设计理论与设计方法论快速成为了一个重要的学术和应用研究领域。1989 年,美国机械工程学会设计技术会议(ASME Design Technical Conferences)新增了设计理论与方法论国际会议(International Conference on Design Theory and Methodology),标志着该研究领域的兴起。设计理论与方法论旨在阐明设计原理、提供设计支持,前者主要借助认知心理学、人工智能、优化、产品管理等知识和理论,后者则建立在鲁棒设计、设计优化、协同工作、面向制造和装配的设计等方法和技术上^[8]。此外,还关注设计教育、计算机辅助设计以及可视化等方面。

若干影响深远的设计理论和方法论也先后确立。1984 年,德国 Pahl 等^[9]的英文版著作《Engineering Design-A Systematic Approach》出版,形成了欧洲区域重要的系统设计方法论。日本东京大学的 Yoshikawa^[10]在 1979 年提出了一般设计学,用集合论观点解释设计的本质。俄罗斯的 Altshuller^[11]从专利中总结发明创造的若干规律,提出了发明问题解决方法 TRIZ。1990 年,美国牛津大学出版社出版了 Suh^[12]教授的著作《The Principles of Design》,重点阐述了基于科学评价的设计原理。按照 Finger 等^[13]的观点,设计理论与方法论聚焦于设计过程模型,前者侧重描述性的设计过程,后者则更关注执行性的设计过程,最后都应该建立相应的可计算模型,以开发计算机辅助设计系统。

1.4 数字化与智能化设计技术

计算机技术以及人工智能技术的发展深刻改变了社会和工业,以至于被认为推动了第三次工业革命。同样也促进了设计方法向设计技术的转变。从 20 世纪 60 年代开始,替代设计人员完成繁重的绘图和复杂的计算成为了数字化设计的重要目标,以 CAD/CAE 为核心的数字化设计系统也成为了计算机集成制造系统不可或缺的重要组成部分^[14-15],支撑了

制造企业的数字化转型升级。

设计是创造性的智力活动,因此设计方法与技术研究从一开始就对人工智能技术寄予了厚望。融合更多的人工智能技术,实现智能化设计,是人工智能领域和设计领域研究人员共同努力的目标^[16-17]。首先,运用专家系统技术,开发设计型的专家系统,汇聚设计知识,支持产品方案设计和详细设计^[18-19]。其次,约束求解、几何推理、模式识别、知识工程等技术也得到应用,形成参数化变量化设计、特征识别等智能化设计技术。20 世纪 80 年代末至 90 年代初,国际信息处理联盟 IFIP 曾连续组织四次智能 CAD 研讨会^[20-23],推动了人工智能领域与设计领域的广泛交流和融合。特别是,已不局限于专家系统技术,以物理系统(包括人工产品)描述和推理为核心的定性推理等也得到了重视^[24-26]。这个时期的智能化设计直接瞄准智能 CAD 系统的开发与实现,但是总体上是人工智能符号主义流派研究成果在设计领域的应用。

2 设计方法与技术 的定式化

2.1 设计方法与技术概览

设计方法与技术丰富多样,已经有研究人员对其进行了调查、总结和分类。日本机械学会设计研究会主任大富浩一^[27]将设计方法与技术分为 16 大类,并按照地域列举了其中若干种设计方法与技术,如图 2 所示。2002 年,日本大阪大学藤田喜久雄^[28]对大阪大学工学研究科机械专业寻求就职意向的企业(涉及原材料、电子元器件、机械零件、装备、工业设施、信息产品、汽车、家电等行业)开展了研发设计方法与工具应用状况的调查,包括 40 种方法与工具,如表 1 所示。美国麻省理工学院机械与系统工程系 Yang^[29]博士发表在美国机械工程师协会设计工程技

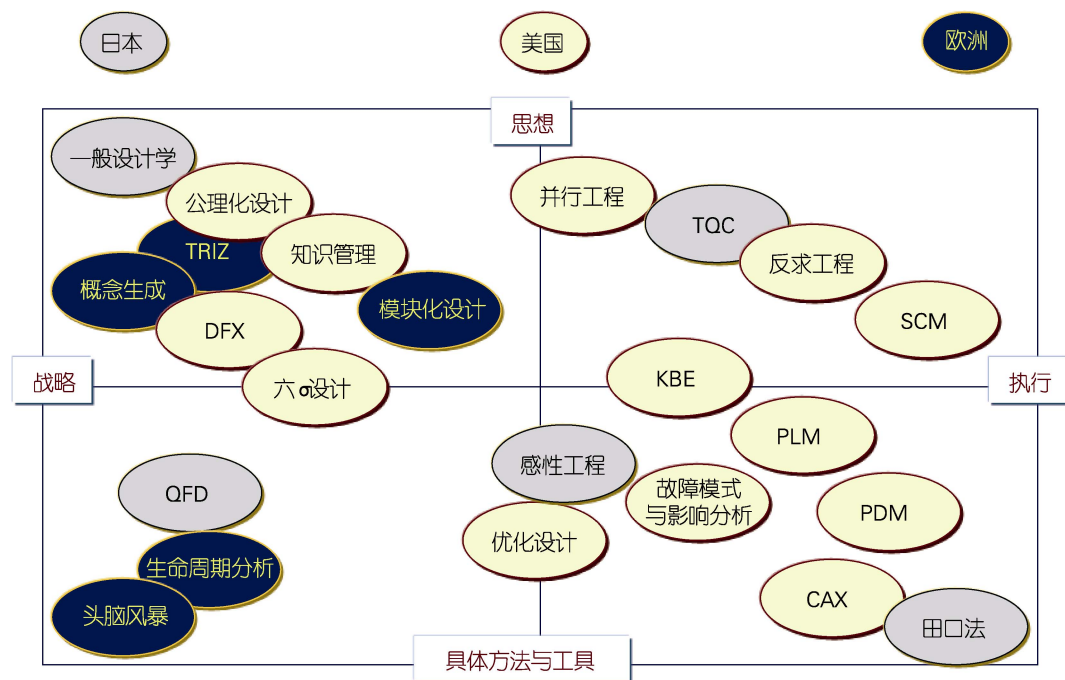


图 2 大富浩一的产品设计方法与技术分类
Fig.2 Classification of product design methods and techniques by Dr.OHTOMI

表 1 被调查的 40 种产品设计方法与工具
Tab.1 40 surveyed product design methods and tools

专利检索	头脑风暴	文献调查	2D-CAD 系统	3D-CAD 系统
设计评审会议	数值分析/仿真	对标分析 1	试验设计	帕累托分析
全面质量管理/控制 TQC/TQM	统计质量控制 SQC	统计过程控制 SPC	质量功能配置 QFD	失效模式影响 分析 FMEA
价值分析 VA	设计目录检索	对标分析 2	KJ 方法	设计原型
田口法	矩阵分析	生命周期评价	商用 CAE 软件	价值图
快速成型	PDM 系统	瓶颈分析	功能结构映射	市川图表分析
基于数学规划的优化设计	面向制造的设计 DFM	面向装配的设计 DFA	故障树分析 FTA	系统工程方法
商用优化设计软件	自主开发的仿真软件	自主开发的优化设计软件	基于活动的成本分析 ABC	熵评估

术会议 DETC2007 的论文,面向来自航空、产品开发、软件与网络、咨询、教育、汽车等行业的工程师、项目主管、产品设计师进行了关于 26 种设计方法与工具的网上问卷调查,了解这些方法与工具的知悉程度与应用情况。包括需求分析、对标分析、故事板、头脑风暴、QFD、公理化设计、TRIZ、DFX、FMEA、系统设计方法、概念选择、设计结构矩阵、稳健设计、极限编程等 14 种方法和工作日志、电子日志(维基)、手绘板、CAD、手工制模、快速成型、网络查询、交流工具(电子邮件、聊天室、网上会议)、外部咨询、项目成本核算、项目管理计划等 12 种工具。关于调查结果及其分析,本文不进行介绍,只关注和考察这些研究提到的各种设计方法与技术。

2.2 设计方法与技术的分类要素

对众多的设计方法与技术进行分类,实际上也是更好理解这些方法技术的一种方式。如表 2 所示,是一种产品设计方法与技术的简单分类,大富浩一也给出了一种分类,但这些分类缺乏明确的依据,更无法用于展望未来的发展。本文提出一种新的产品设计方法与技术分类框架,用于认识已有的产品设计方法与技术的属性,也可以用于未来发展的预测。

根据对已有的产品设计方法与分析,可以确定这个分类框架主要有四个分类要素,即设计对象、设计阶段、设计资源和设计手段。分类要素也可以认为是维度。设计对象是产品的组成部分或整体,设计阶段是产品全生命周期维度的分类要素,设计资源是关于设计方法与技术的输入输出,设计手段则是设计方法与技术依据,以及遵循的物理、化学、心理学等学科的理论、方法和技术,也可以嵌套地包含其他设计方法。

表 2 产品设计方法与技术的分类要素
Tab.2 Classification elements for product design methods and techniques

设计对象	设计阶段	设计资源	设计手段
零件	概念设计	文档/图纸	类比
部件	方案设计	知识	物理实验
机构	结构设计	模型	设计问题解决方法
产品	详细设计	数据	设计理论与方法论
装备			系统工程
.....			计算机图形学
			人工智能
			虚拟现实/增强现实
			大数据分析
			互联网
			

2.3 设计方法与技术的形式化定义与示例

根据分类要素,设计方法与技术可以形式化定

义为:
$$DMT = f(d_o, d_p, d_r, d_m) \tag{1}$$

式中, DMT 表示某种设计方法或技术, d_o 表示设计对象要素, d_p 表示设计阶段要素, d_r 表示设计资源要素, d_m 表示设计手段要素。另外,需要强调的是,由于设计方法与技术往往是集成方法或集成技术,所以 d_o 、 d_p 、 d_r 、 d_m 不限于只有一项要素,可以有多项。 d_m 的内容最广泛,最基本的可以是数学、物理、化学、生理学等基础科学,也可以是最新的其他领域的理论和技术。

给出若干示例如下:

- 1) 系统设计方法论 $f(\{\text{产品、装备}\}, \{\text{产品规划、概念设计、实体设计、详细设计}\}, \{\text{功能模型、设计文档}\}, \{\text{系统工程、功能分解、形态学组合、.....}\})$ 。
- 2) 质量功能配置 $QFD=f(\{\text{产品、装备}\}, \text{需求分析(产品规划)}, \{\text{市场调查报告、用户反馈意见}\}, \text{需求清单}, \{\text{矩阵分析、加权统计法}\})$ 。
- 3) 计算机辅助设计 $CAD=f(\{\text{零件、部件、产品}\}, \{\text{实体设计、详细设计、生产设计}\}, \{\text{图纸、模型}\}, \{\text{计算机图形学、工程图学}\})$ 。
- 4) 产品数据管理 $PDM=f(\{\text{零件、部件、产品、装备}\}, \{\text{实体设计、详细设计、生产设计}\}, \{\text{电子文档、产品数据、模型}\}, \{\text{数据库管理}\})$ 。

3 数字化智能化设计技术的热点方向

设计方法向设计技术转化,是必然的趋势。而在计算机出现之后,数字化设计技术成为主要的设计技术。计算机信息技术的快速发展成为新工业革命的重要驱动力,也深刻地改变着设计模式^[30]。数字化智能化设计技术一方面在持续深化,另一方面也在不断创新。下面介绍数字化智能化设计技术的三个热点方向。

3.1 基于模型的系统设计与仿真优化

计算机辅助设计与建模最早以详细设计为对象,也就是几何建模与设计。经历了计算机辅助绘图、三维几何建模、特征建模等阶段,为了实现设计与产品全生命周期其他环节更紧密、流畅的集成与衔接,以替代工程图纸为目标的基于模型的产品定义 MBD (Model-based Definition) 得到关注^[31-32]。MBD 模型以精确的三维几何模型承载各种技术信息,从而构成产品的完整定义。MBD 模型的完整信息继续传递给详细设计之后的下游制造、服务等环节并被处理,从而实现 MBD 驱动的全三维一体化设计制造。

尽管有很多设计方法支持上游设计,但是大多数都不是计算机辅助技术。虽然 20 世纪 90 年代,研究人员应用人工智能研究成果探索了计算机辅助概念设计技术^[33],但是并没有被工业界接受。直到国际系

统工程协会 INCOSE(International Council on Systems Engineering) 发布了《系统工程愿景 2020》^[34], 并指出, 基于模型的系统工程 MBSE (Model-based Systems Engineering) 是支持需求定义、设计、分析、验证等系统工程大多数活动的建模应用。按照本文提出的定式化分类框架, 基于模型的系统设计与仿真优化 (等同于 MBSE) 可以定义为: 基于模型的系统设计与仿真优化技术= $f(\{ \text{产品、装备、系统} \}, \{ \text{产品规划、概念设计、实体设计} \}, \{ \text{模型、知识} \}, \{ \text{系统工程、软件工程、SysML} \})$ 。

可见, 与 MBD 向后集成不同, 基于模型的系统

设计与仿真优化技术立足于对产品系统或装备的需求、功能、架构的建模表达, 实现多模型的关联、驱动以及验证确认, 从而支持产品上游阶段的创新与优化^[35-37]。这些模型已经不再是几何模型, 而是系统模型。运用系统工程思想, 借鉴软件开发手段, 采用统一的建模语言表达 SysML。基于模型的系统设计与仿真优化 V 形过程与集成的工具和技术如图 4 所示。基于模型的系统工程或基于模型的系统设计与仿真优化近年来在我国航空、航天、船舶等行业得到不同程度的应用或实践, 支撑了复杂装备的创新研制。

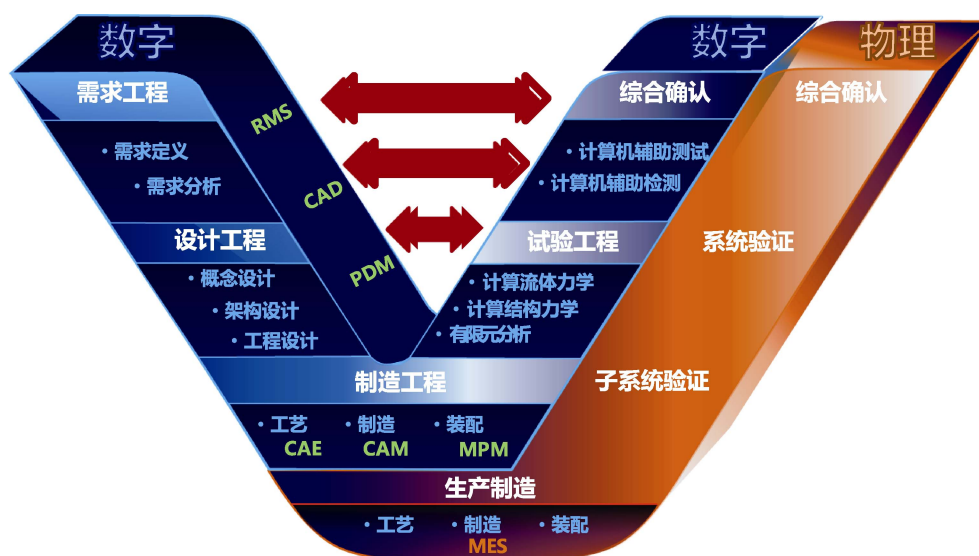


图 3 基于模型的系统设计与仿真优化 Vee 模型

Fig.3 Vee model of model-based system design, simulation and optimization

3.2 基于互联网的开放式众包设计

20 世纪 90 年代互联网得到迅猛发展, 为集力集智提供了跨地域跨时空的基础手段。在这种形势下, 2006 年, 美国《连线》杂志记者 Howe^[38]首次推出了众包的概念, 总结和描述了与传统外包截然不同的、由非特定的大众志愿者完成价值共创的模式。众包的特点是开放式、自由自愿参与式、非固定多元化, 实质上是将专业工作转变为一种社会化创新活动^[39-40]。众包的具体形式多种多样, 可以是类似“创新中心”(InnoCentive)的网站, 聚集众多深藏不露的科研人才, 各显其能帮助企业解决技术难题, 也可以是拥有各种资源的人或企业, 通过云服务平台, 提供他人需要的资源。众包最早在软件开发行业取得显著成效, 代表就是 AppStore 的开发。

设计是创新的综合性活动, 现代产品设计往往需要考虑技术、质量、市场、社会、环境等多重因素, 实际上涉及多学科多专业, 因此, 现代产品设计与众包从某种意义上讲, 具有更自然的符合性, 两者的结合顺理成章。不久之后, 开放式众包设计技术便成为

热点方向^[41-43]。按照本文提出的定式化分类框架, 基于互联网的开放式众包设计技术可以定义为: 基于互联网的开放式众包设计技术= $f(\{ \text{零件、部件、产品、装备、系统} \}, \{ \text{产品规划、概念设计、实体设计、详细设计、生产设计} \}, \{ \text{数据、知识、智力} \}, \{ \text{互联网、众包理论、区块链} \})$ 。

2010 年, 美国国防部高级研究计划局 DARPA 启动了“自适应运载器制造”(AVM)系列项目, 旨在掌握全新的数字化设计、验证、制造技术, 从根本上变革现有的研制方法, 缩短研制周期。其中一项探索就是搭建开源平台 VehicleForge, 将复杂系统的设计过程向大众开放, 让众多不具隶属关系的开发者能够参与到地面车辆、飞机等军用装备系统的设计中, 实现“网络民主化”协同创新设计。国家重点研发计划网络协同制造和智能工厂重点专项项目“支持个性化设计的众包平台研发”(牵头单位天津大学)面向前沿技术创新型众包设计模式和设计能力拓展型众包设计模式, 建立了产品众包设计理论和技术体系(如图 4 所示), 在海尔和猪八戒股份有限公司开展了验证应用^[44]。

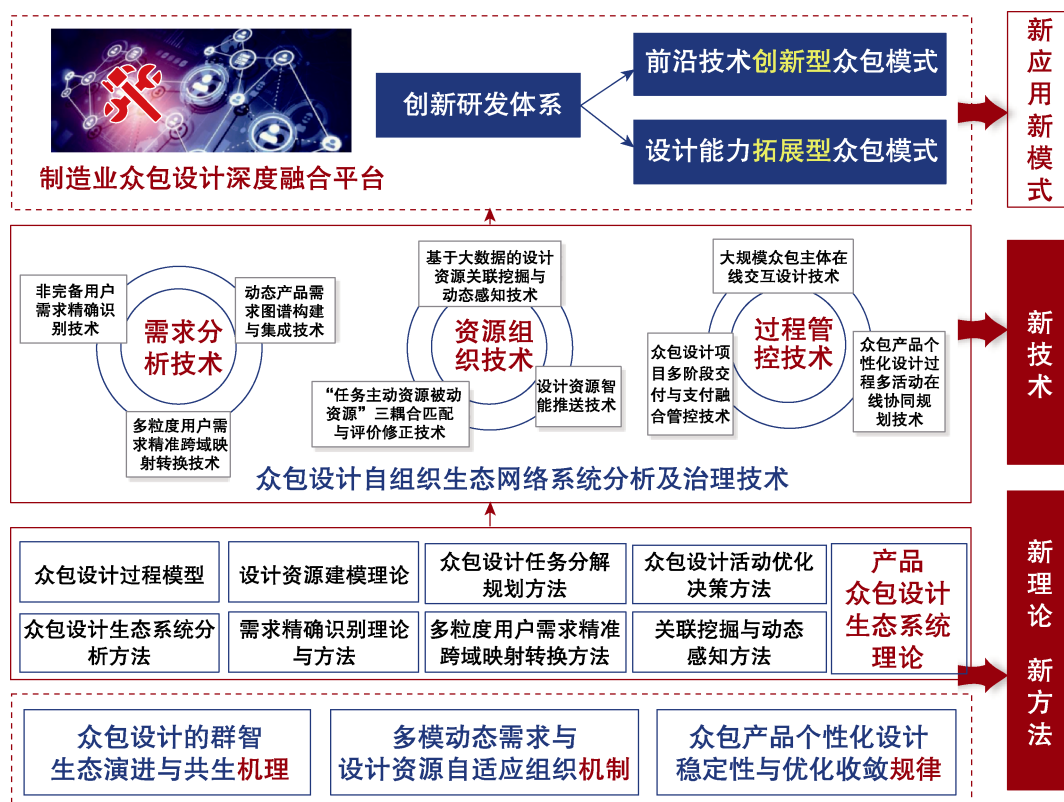


图 4 产品众包设计理论与技术体系

Fig.4 Design theories and techniques of crowdsourcing product

3.3 数据驱动的设计

自 2008 年起,在 MIT 公布的“十大突破性技术”榜单上,人工智能技术经常榜上有名,而且不断增多。例如,2008 年的机器学习、2009 年的 Siri、2013 年的深度学习、2014 年的神经形态芯片、2016 年的语音接口与知识分享型机器人、2017 年的自动驾驶卡车与强化学习以及 2018 年的大众人工智能(AI for Everybody)等。这是新一轮的人工智能浪潮,借助海量的信息资源,计算机已可以识别物体,并实时进行语言转换或翻译,人工智能终于变得更加聪明。机器学习和大数据技术成为了人工智能的主流技术。

与之前一样,新一代人工智能技术很快就被当作设计手段,并积极地与设计方法和技术相融合。按照本文提出的定式化分类框架,数据驱动的设计技术可以定义为:数据驱动的设计技术= $f(\{\text{零件、部件、产品、装备、系统}\}, \{\text{产品规划、概念设计、实体设计、详细设计、生产设计}\}, \{\text{数据、知识}\}, \{\text{机器学习、大数据}\})$ 。

2017 年 11 月,美国机械工程师学会机械设计(Journal of Mechanical Design)杂志出版了“Data-Driven Design(数据驱动的设计)”^[45]。主要的研究包括从用户评论数据中挖掘用户喜好^[46]、从技术文档中挖掘产品功能信息^[47]以及利用运行数据监控产品功能状态进而改进设计^[48]等。国家重点研发计划网络协同制造和智能工厂重点专项项目“产品自适应在线

设计技术平台研发”(牵头单位天津大学)提出了产品自适应设计过程模型(如图 5 所示),突出了对市场、设计、制造、运维等多域数据的分析,支持产品设计思想,在装备制造企业开展了验证应用^[49]。

4 数字化智能化设计技术的发展挑战

产品设计方法与技术的定式化分类框架也可以用于预测数字化智能化设计技术的发展。事实上,如果将分类要素当作变量,那么,通过考察分类要素未来可能的变化,至少可以确定未来数字化智能化设计技术的特征和范围。其中,设计对象相对稳定,设计资源类别也有限,最可能变化的分类要素是设计阶段和设计手段。特别是设计手段随着科技的发展,其本身会有较大的扩展,甚至具有一定的不确定性。这里简单讨论数字化智能化设计技术发展的两个方向。

一是产品全生命周期一体化设计。主要是指设计阶段要素从单个或若干设计环节向产品全生命周期扩展。正如前面提到的,在 MBD 和 MBSE 发展到一定程度时,模型驱动整个产品生命周期一体化成为必然,实现基于模型的工程或基于模型的企业,其中一个核心就是如何打造数字主线,通过各种模型的关联、转换以及信息反馈,从而促进设计协同乃至产品全生命周期协同。

二是混合智能驱动的创新设计。人工智能技术仍然在不断发展,更多的人工智能技术会融入设计方法

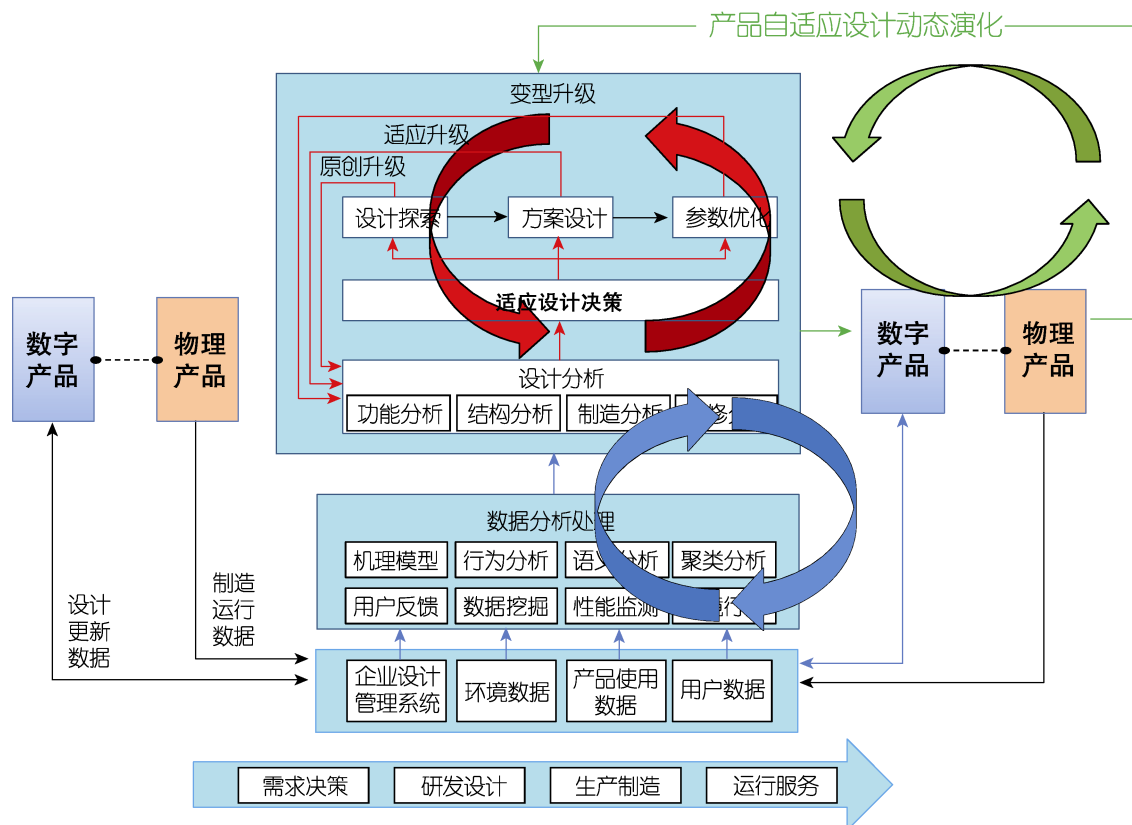


图5 数据驱动的产品自适应设计过程模型
Fig.5 Process model of data-driven product adaptive design

与技术中,整体上解决更多设计阶段更多类型的设计问题。基于知识的设计、基于模型的设计、数据驱动的设计各有优势和适用范围。也正如人工智能2.0中混合智能所说明的,人类的智能是混合的综合的,设计智能也是混合的综合的,那么各种人工智能技术的融合也是必然的。

毋庸置疑,数字化智能化设计技术发展面临的挑战依然存在。一是数字化智能化设计技术将带来设计模式的转变,但这些转变必须在条件具备的情况下才可能被接受。例如,全三维建模试图用模型替代图纸,但其实图纸很难被替代弃用。二是陷入人工智能研究的困境。人类的智能实际上到目前为止也很难说彻底、研究明白,人工智能往往还是只在某些方向上取得进步,或者存在很大的不确定性,那么必然会影响到设计技术智能化程度的提升。三是认识的挑战。早期的数字化智能化设计技术能够被接受,是因为确实减轻了设计人员的负担。但是与 ChatGPT 类似,功能强大的智能设计技术可能会让设计人员觉得有被替代或边缘化的危险。

5 结语

本文提出了一种用于产品设计方法与技术定式化的分类框架,不仅能够简洁地把握各种产品设计方法与技术的特征和内涵,也界定了基于模型的系统设

计与仿真优化、基于互联网的开放式众包设计和数据驱动的设计三个热点研究方向,进而指出产品全生命周期一体化设计、混合智能驱动的创新设计是发展方向,最后讨论了数字化智能化设计技术发展将面临的挑战。

参考文献:

- [1] OTTO K N, WOOD K L. Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [2] DAGLI C H, KUSIAK A. Intelligent Systems in Design and Manufacturing[M]. New York, NY: ASME Press, 1994.
- [3] CROSS N. Engineering Design Methods: Strategies for Product Design, 5th Edition[M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2021.
- [4] WILLIS R. Principles of Mechanism: General Principles of Aggregate Motion[M]. London: Longmans, 1841.
- [5] UNWIN W. The Elements of Machine Design[M]. London: Longmans, 1861.
- [6] 柴邦衡, 黄费智. 现代产品设计指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] CHAI Bang-heng, HUANG Fei-zhi. Guide to Modern Product Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [7] HANINGTON B, MARTIN B. Universal Methods of Design[M]. Gloucester: Rockport Publishers, 1994.

- [8] ELMARAGHY W, SEERING W, ULLMAN D (eds). Proceedings of The 1989 ASME Technical Conferences- 1st International Conference on Design Theory and Methodology[C]. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, 1989.
- [9] PAHL G, BEITZ W. Engineering Design: A Systematic Approach[M]. London: Springer-Verlag, 1984.
- [10] YOSHIKAWA H. General Design Theory[J]. Journal of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 1987, 2(3): 173-182.
- [11] ALTSHULLER G. Creativity as an Exact Science[M]. New York, NY: Gordon and Breach Publishers, 1984.
- [12] SUH N P. The principles of design[M]. New York: Oxford University Press, 1990
- [13] FINGER S, DIXON J. A Review of Research in Mechanical Engineering Design. Part I: Descriptive, Prescriptive, and Computer-Based Models of Design Processes[J]. Research in Engineering Design, 1989, 1(1): 51-67.
- [14] HARRINGTON J. Computer Integrated Manufacturing [M]. New York, NY:Industrial Press, 1973.
- [15] REHG J A, KRAEBBER H W. Computer Integrated Manufacturing [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2004.
- [16] BROWN D, CHANDRASEKARAN B. Design Problem Solving[M]. London: Pitman Publishing, 1989.
- [17] GERO J S. Artificial Intelligence in Design, '91[M]. Oxford [England]: Butterworth-Heinemann, 1991.
- [18] 周济,王群,周迪勋. 机械设计专家系统概论[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989.
- ZHOU Ji, WANG Qun, ZHOU Di-xun. Introduction to Mechanical Design Expert System[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1989.
- [19] 周济, 查建中, 肖人彬. 智能设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- ZHOU Ji, ZHA Jian-zhong, XIAO Ren-bin. Intelligent Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [20] GOSSARD D, YOSHIKAWA H(eds.). Proceedings of the IFIP TC 5/WG 5.2 Workshop on Intelligent CAD[C]. Amsterdam: North-Holland, 1987.
- [21] HOLDEN T, YOSHIKAWA H(eds.). Proceedings of the Second IFIP TC 5/WG 5.2 Workshop on Intelligent CAD[C]. Amsterdam: North-Holland, 1988.
- [22] YOSHIKAWA H, ARBAB F(eds.). Proceedings of the Third IFIP TC 5/WG 5.2 Workshop on Intelligent CAD[C]. Amsterdam: North-Holland, 1989.
- [23] BROWN D, WALDRON M, YOSHIKAWA H(eds.). Proceedings of the IFIP TC 5/WG 5.2 Workshop on Intelligent Computer Aided Design[C]. Amsterdam: North-Holland, 1991.
- [24] WELD D S, DE KLEER J. Readings in Qualitative Reasoning About Physical Systems[M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1990.
- [25] FALTINGS B. Qualitative Kinematics in Mechanisms [J]. Artificial Intelligence, 1990, 44(1-2): 89-119.
- [26] JOSKOWICZ L, SACKS E P. Computational Kinematics[J]. Artificial Intelligence, 1991, 51(1-3): 381-416.
- [27] 大富浩一. 初步から学ぶ設計手法[M]. 東京: 工業調査会, 2007.
- OHTOMI K. Learning of Design Engineering Based on Elementary Approach[M]. Tokyo: Industrial Committee, 2007.
- [28] 藤田喜久雄, 松尾崇宏. 製品開発における手法とツールの活用状況の調査と分析[J]. 日本機械学会論文集(C編), 2006, 72(713): 290-301.
- FUJITA K, MATSUO T. Survey and Analysis of Utilization of Tools and Methods in Product Development [J]. Proceedings of JSME (C series), 2006, 72(713): 290-301.
- [29] YANG M C. Design Methods, Tools, and Outcome Measures: A Survey of Practitioners[C]. Proceedings of ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 217-225. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [30] 譚建榮, 馮毅雄. 智能設計: 理論與方法[M]. 北京: 清華大學出版社, 2020.
- TAN Jian-rong, FENG Yi-xiong. Product Intelligent Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [31] QUINTANA V, RIVEST L, PELLERIN R, et al. Will Model-Based Definition Replace Engineering Drawings Throughout the Product Lifecycle? a Global Perspective from Aerospace Industry[J]. Computers in Industry, 2010, 61(5): 497-508.
- [32] ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-Based Definition Design in the Product Lifecycle Management Scenario[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1): 1-14.
- [33] KRAUSE F, BAUMANN R, KAUFMANN U, et al. Computer Aided Conceptual Design[C]. Saarbruecken, Germany: The 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 2003.
- [34] INCOSE. SE Vision 2020(INCOSE-TP-2004-004-02) [R]. San Diego: INCOSE, 2004.
- [35] DORI D. Model-Based Systems Engineering with OPM and SysML[M]. New York, NY: Springer, 2016.
- [36] BORKY J M, BRADLEY T H. Effective Model-Based Systems Engineering[M]. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2019.
- [37] MADNI A M, BOEHM B W, ERWIN D, et al. Recent Trends and Advances in Model Based Systems Engineering[M]. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022.
- [38] HOWE J. The Rise of Crowdsourcing[J]. Wired, 2006, 14(6): 176-183.
- [39] 侯文華, 郝琳娜. 眾包模式: 企業創新的新助力[M]. 北京: 科學出版社, 2016.
- HOU Wen-hua, HAO Lin-na. Crowdsourcing Model: a

- New Boost for Enterprise Innovation[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [40] 罗仕鉴.《群智创新: 人工智能 2.0 时代的新兴创新范式》序言[J]. 包装工程, 2020, 41(6): 12.
- LUO Shi-jian. Preface to "Swarm Intelligence Innovation: A New Innovation Paradigm in the Age of Artificial Intelligence 2.0"[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(6): 12.
- [41] LIU Ang, LU S C Y. A Crowdsourcing Design Framework for Concept Generation[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 177-180.
- [42] YANG Mao-lin, LI Wei-dong, JIANG Ping-yu. A Collective Intelligence Oriented Three-Layer Framework for Socialized and Collaborative Product Design[J]. Expert Systems With Applications, 2021, 173: 114742.
- [43] JIAO Yuan-yuan, WU Ye-peng, LU S. The Role of Crowdsourcing in Product Design: The Moderating Effect of User Expertise and Network Connectivity[J]. Technology in Society, 2021, 64: 101496.
- [44] 郭伟, 王震, 邵宏宇, 等. 众包设计理论及关键技术发展研究[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(9): 2650-2665.
- GUO Wei, WANG Zhen, SHAO Hong-yu, et al. Research on Crowdsourcing Design Theory and Key Technology Development[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(9): 2650-2665.
- [45] KIM H, LIU Ying, WANG C, et al. Special Issue: Data-Driven Design (D3)[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(11): 110301.
- [46] CHAKLADER R, PARKINSON M B. Data-Driven Sizing Specification Utilizing Consumer Text Reviews[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(11): 111406.
- [47] CHEONG H, LI Wei, CHEUNG A, et al. Automated Extraction of Function Knowledge from Text[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(11): 11407.
- [48] MA Hong-zhan, CHU Xue-ning, LYU Guo-lin, et al. An Integrated Approach for Design Improvement Based on Analysis of Time-Dependent Product Usage Data[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(11): 111401.
- [49] 王磊, 孟昭鹏, 刘继红, 等. 产品自适应设计: 概念、原理和技术[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(9): 2748-2765.
- WANG Lei, MENG Zhao-peng, LIU Ji-hong, et al. Product Adaptive Design: Concept, Principle and Technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(9): 2748-2765.

责任编辑: 马梦遥

(上接第 14 页)

- [47] 金思雨, 覃京燕. 基于计算机图像风格迁移的音乐可视化智能设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(16): 193-198.
- JIN Si-yu, QIN Jing-yan. Music Visualization Intelligent Design Based on Image Style Migration[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(16): 193-198.
- [48] 谭宇彤, 周旭峰, 孔令芝, 等. 面向肌电信号的虚拟现实提线木偶动画研究[J]. 软件学报, 2019, 30(10): 2964-2985.
- TAN Yu-tong, ZHOU Xu-feng, KONG Ling-zhi, et al. Research on Puppet Animation Controlled by Electromyography(EMG) in Virtual Reality Environment[J]. Journal of Software, 2019, 30(10): 2964-2985.
- [49] CAO Chun-nan, GAO Yi-ping. Research on National Costume Design Based on Virtual Reality Technology[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-9.
- [50] 刘天元. 3D 打印技术在纺织服装领域应用的进展[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(11): 81-84.
- LIU Tian-yuan. Application Progress of 3D Printing Technology Textile and Apparel Field[J]. Cotton Textile Technology, 2022, 50(11): 81-84.
- [51] LIU Kai-xuan, GAO Yuan-yuan, ZHANG Jia-qi, et al. Study on Digital Protection and Innovative Design of Qin Opera Costumes[J]. Heritage Science, 2022, 10(1): 127.
- [52] LIU Kai-xuan, ZHOU S, ZHU Chun, et al. Virtual Simulation of Yue Opera Costumes and Fashion Design Based on Yue Opera Elements[J]. Fashion and Textiles, 2022, 9(1): 31.
- [53] LIU Bo, GAN Jian-hou, WEN Bin, et al. An Automatic Coloring Method for Ethnic Costume Sketches Based on Generative Adversarial Networks[J]. Applied Soft Computing, 2021, 98: 106786.
- [54] WU Qiang, ZHU Bai-xue, YONG Bin-bin, et al. Cloth-GAN: Generation of Fashionable Dunhuang Clothes Using Generative Adversarial Networks[J]. Connection Science, 2021, 33(2): 341-358.
- [55] 马钰玺. 基于图像风格迁移的中华文化元素艺术化生成方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- MA Yu-xi. Chinese Calligraphy Style Recognition Based on Deep Learning[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

责任编辑: 马梦遥