

【专题：人工智能 2.0 与数智化创新设计】

群智设计发展趋势及分析

郭伟^{1,2}, 王震², 石丽雯^{1,2}, 刘金剑¹

(1.天津仁爱学院, 天津 301636; 2.天津大学 装备设计与制造技术天津市重点实验室, 天津 300350)

摘要: **目的** 通过文献计量分析方法, 研究当前众包模式下, 以群体智慧协同为主要设计方式的产品设计新范式。**方法** 以群智设计的概念为基础, 采集 2000 年以来国内外知名的数据库相关研究文献进行统计分析, 梳理群智设计的关键要素及典型特征, 探讨其与其他产品设计与方法之间的异同, 总结群智设计的发展趋势, 概述群智设计研究存在的挑战。**结果** 众包模式下的群智设计执行机制灵活、设计创新高效、知识技能广泛, 能够应对海量个性化用户需求的挑战, 适应现代产品的发展要求。**结论** 群智设计的关键要素和典型特征区别于现有的典型产品设计方法, 阐明了群智设计的本质; 群智设计的 3 个类型和层次模型, 概括了群智设计的发展要求; 随着众包模式的不断应用, 开放平台、用户需求、设计群体三元融合发展, 群智设计的研究更加广泛、健全, 逐渐从需求、平台和群体等方面向任务分解、群体组织、过程管控等方向发展。

关键词: 产品设计; 开放式创新; 众包; 群体智慧

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0015-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.002

Development Trend and Analysis of Collective Intelligence Design

GUO Wei^{1,2}, WANG Zhen², SHI Li-wen^{1,2}, LIU Jin-jian¹

(1.Tianjin Ren'ai College, Tianjin 301636, China; 2.Tianjin Key Laboratory of Equipment Design and Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

ABSTRACT: The work aims to study the new product design paradigm through bibliometrics analysis method with collective intelligence collaboration as the main design mode under the current crowdsourcing mode environment. Based on the concept of collective intelligence design, the relevant literature from 2000 was collected from well-known databases in China and abroad for statistical analysis, the key elements and typical characteristics of collective intelligence design were combed, the similarities and differences between collective intelligence design and other product design theories and methods were summarized, the development trend of collective intelligence design was concluded, and the challenges existing in collective intelligence design research were reviewed. Collective intelligence design in crowdsourcing mode environment had flexible implementation mechanism, innovative and efficient design and extensive knowledge and skills, and could meet the challenges of massive personalized users' needs and satisfy the requirements of modern product development. The key elements and typical characteristics of collective intelligence design are different from those of the existing typical product design methods, and the essence of collective intelligence design is clarified. Three types and hierarchical models of collective intelligence design summarize the development requirements of collective intelligence design. With the continuous application of crowdsourcing mode, the ternary integration of open platform, user demand and design group has developed, and the research on collective intelligence design has become more extensive and sound, gradually developing from demand, platform and group to task decomposition, group organization and process management and control.

KEY WORDS: product design; open innovation; crowdsourcing; collective intelligence

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: “群智创新驱动下人机联合认知的产品概念设计理论研究”天津市教委科研计划项目 (2022KJ042)

作者简介: 郭伟 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为众包设计、开放式创新、群智创新。

通信作者: 石丽雯 (1986—), 女, 博士生, 讲师, 主要研究方向为群智社区协同创新、互联网产品设计。

创新是引领发展的第一动力^[1],创新是产品设计的本质要求。随着用户个性化、多样化需求的不断增长,以及信息经济的不断发展,产品创新发展面临着海量动态的个性化设计的挑战以及持续增长的创新需求与有限资源矛盾的制约^[2]。现有设计理论和方法在产品创新上的不足和缺陷越发明显,没有得到进一步发展,无法有效解决上述矛盾^[3]。

处于产品创新瓶颈期的企业利用开放式创新理念^[4],主动打破企业组织“边界”,借助互联网平台积极引入企业外部资源,促进其与内部资源的设计合作与产品创新,促进知识流动与交互,提高产品创新效率,加快企业创新研发设计的发展^[5]。与此同时,信息通讯技术的不断融合与快速发展带来的通讯革命,催生了信息社会、知识社会等新形态,带来了“以用户为中心、以社会实践为舞台、以共同创新、开放创新为特点的用户参与”的创新 2.0^[6],推动了创新模式的蜕变,加速催化了互联网形态向 Web 2.0 转变。在此背景下,企业和公司开始关注互联网闲散资源的创新潜力,构建开放式社区或平台,吸引大规模网络资源进行协作设计,如 OpenIDEO、InnoCentive、猪八戒网、海尔开放创新平台(Haier Open Partnership Ecosystem, HOPE)等。这种将传统上由指定人员完成的任务以自由自愿的形式公开向一群非特定的大规模群体进行外包的模式称为众包^[7]。就开放程度而言,相较于利用内外部资源的开放式创新,众包在更大程度上依赖外部创新力量,可以看作是开放式创新理念的进一步发展,并不断与产品设计创新融合,是共享经济时代一种新的创新发展设计模式。

众包模式是指开放的互联网平台或社区将企业创新研发需求或其他个性化用户需求,通过网络分包给网络设计爱好者,企业或用户可以从所提交的方案中择优选择,最终给予中标者适当的奖励。随着众包模式逐渐发展成熟,尤其在产品创新设计领域方兴未艾,对众包的研究已经不再局限于组织架构^[8]、知识产权管理^[9]、激励策略^[10]等方面,而是着重开始关注众包赖以系的大众群体的潜在力量,探究大众群体的专业技能和知识水平^[3]、成员组织调度^[11]、设计质量评价^[12]等内容,然而,有关群体智慧在设计领域方面的研究还有很大的空白,为此,本文在众包模式下,提出群智设计的概念、特征与要素、研究趋势及发展挑战,为产品设计与创新提供借鉴,促进现代产品设计理论的发展。

1 理论基础

1.1 群智设计的定义

众包模式是基于开放式创新理念,在知识社会和信息经济环境下,强调大众参与并依靠信息通讯技术支撑的产品创新设计范式。它是互联网、区块链等信

息技术的具体应用,也通过创新 2.0 方法论的实践,构建了以开放创新、用户创新、大众创新、协同创新为特征的企业创新发展模式,实现以人为本的可持续创新发展^[2]。群体智慧是众包模式的核心,互联网社会化群体多学科、高技能的特点为设计提供了不竭的创意来源,以群体协作设计产品,以群体智慧创新产品,群策群力,从而提高产品对市场的适应性,使企业更具创新活力,实现长远发展。

“群体”一词泛指具有共同特性的个体所组成的整体,从有无生命特征的角度可以分为两类:生物群体和智能群体。智能群体特指由一批智能化设备通过各种传感器和信息通信技术彼此联系的整体;生物群体又可分为动物群体和人类群体。英文对“群体”的用词和解释非常明确,“swarm”代表社会性动物群体,“collective”“crowd”“group”表示人类群体,相关领域常用“intelligence”与“wisdom”表示“智慧(或智能)”,两两相互组合即可表示不同物种的群体智慧;国内很多学者在阐述时常译为如下名称:“群体智慧”“群体智能”“集体智慧”“集体智能”“大众智慧”等。江平宇等^[13]对集体智慧进行系统总结,划分出 3 种类型:人类系统集体智慧、社会性动植物系统集体智慧、人工智能系统集体智慧。不论是哪类集体智慧,自从“群体智慧”的概念被提出以来,国内外对“群体智慧”的通用定义为:大量个体通过交互活动和相互作用,在整体系统层面涌现出超越个体层面知识与智慧总和的一种解决问题的能力。国内外围绕“群体智慧”的一系列学术研究和讨论从未间断。

Ouphachay^[14]区分了人工智能和人类智能的不同之处,阐述了两智能的优点和局限性。文献^[15]回顾了 2012—2015 年有关 Collective Intelligence(CI)研究的高影响力期刊文章,重点调查了学习、技术和决策,认为 CI 提供了一种替代知识创造、使用技术和帮助决策的方法。Surowiecki^[16]肯定了人类群智的重要价值和意义,总结为认知、协作与合作,提出群体变睿智需要个体的多样性和独立性,以及特殊条件下的分散化。国内学者从系统综述角度对群智展开了研究。刘海鑫等^[17]探讨了人类群智的内涵、组成及形成过程,综述了国内外对群智优越性及应用的研究,从个体智慧贡献、群智形成、群智平台发展等方面梳理了群智发展的影响因素,构建了群智理论研究框架,总结了群智在创新、决策、知识管理等方面的应用。文献^[18]研究了国外人类群智概念的代表性观点,凝练出国外五大研究主题:价值评估、效能实现、质量控制、技术支持和实际应用。靖鲲鹏等^[19]区分了国外“群体智能”(Swarm Intelligence, SI)和“集体智慧”(Collective Intelligence, CI)的概念,并进行了详细的专题分析,两者都偏重理论研究,理论研究多于实际应用。最后,结合国外研究情况及发展趋势,提出了相应的研究启示。

在研究人类社会群体智慧的同时,不少学者提出了群智创新的概念。文献^[20]采用抽样法研究了企业小组成员的协作过程,旨在识别导致群智的激励因素,并了解这些因素之间的相互关系以及与企业创新的关系,结果发现:群体智慧会影响工作流程、操作和服务创新。Yun等^[21]考察了集体智慧与开放式创新之间的关系,认为集体智慧或群体创新不仅能够产生创造性的想法或发明,而且可以以一种耦合的方式进行创新,验证发现在汽车和制药行业存在效应差异,在汽车行业产生了积极的影响。罗仕鉴^[22]、梁存放等^[23]研究了创新范式的演进发展,阐述了群智创新的概念、研究内容、特点,研究群智创新的过程及关键技术,进一步归纳了群智创新驱动的信息产品设计8D模型。文献^[24]提出了一种快速识别群智项目创新潜力水平的方法,利用创新扩散理论和信息接收模型,从用户和项目特征的数量和质量两个维度的相关参数研究其对项目持续创新的影响,提出群智项目创新潜力的管理策略——用户存量为王,量变决定质变。王磊等^[25]研究了群智创新社区的用户创新能力,识别并划分了4种不同创新能力的用户类型,并分别进行了社区影响作用分析,为社区制定管理措施、合理匹配供需提供了一定的借鉴。

罗仕鉴^[26]阐述了社会设计、设计众包、群体智能的内涵与研究内容,比较分析后提出了一种广义的群智设计的概念:在新经济环境下,聚集多学科资源,通过互联网组织和人工智能系统,吸引、汇聚和管理专家团队和大规模参与者,以竞争、合作等方式共同应对挑战性任务。江平宇等^[13]研究了集体智慧在社群化制造中的应用,其中社群化设计环节的本质是群智设计,利用海量的社会化设计资源完成包括用户需求挖掘、创意生成、详细设计、方案评估、决策等在内的设计全过程。Yang等^[27]建立了一个面向集体智慧的三层社群化群智产品设计框架。第一层着重于设计任务分解和子任务分析,第二层侧重于使用定制的Blackboard模型为子任务生成可选的设计解决方案,第三层侧重于使用模糊VIKOR算法驱动的共识达成模型确定最优的解决方案。该框架能够支持社会化参与者之间的有序交互、相互激励、群体决策和参与激励,从而将社群化群智产品设计模式的应用范围从软件和小规模物理产品扩大到相对复杂、高价值的物理产品。文献^[28]基于自然现象中的群体智慧,构建了一个由探索、整合和反馈等活动组成的闭环群智模型,本质上是面向问题的人工智能驱动信息集成和反馈的群智现象。

对群智设计概念、发展等的研究工作从未停止,尤其在由Web 2.0催化的众包平台或开放社区环境下,群智参与设计得到空前发展。基于以上研究成果以及之前的研究工作^[2],为众包模式中群智设计进行一个相对狭义的定义:群智设计是一种在互联网开放

式社区/平台中,利用其潜在的创造力满足用户个性化需求的产品设计方法。平台管理者设计多样化的激励机制,吸引、汇聚海量多元化学科背景和专业技能的分布式网络群体,以合作、竞争等自主协作方式参与平台中的设计任务,并组织、管理设计方案生成全过程。

作为一种新的设计模式和创新方法^[29],群智设计利用分布式网络资源提供的高质量知识服务,促进个体隐性知识显性化,实现闲散知识价值化和生产力转化^[30]。群智设计改变了人类的工作方式和经济模式,同时也重塑了科学的研究方法和创新生态。它充分发挥了互联网在网络分布式大众资源配置中的优化和集成作用,将网络闲置智力资源的创新潜力深度融入满足用户动态化个性化需求、突破产品关键技术之中,提升了企业开放平台或开放社区的创造力和影响力,形成更广泛的以开放平台为实施基地,以即时通信技术为实现工具的产品设计与创新发展新形态。

相较于其他产品设计方法,群智设计具备2个明显优势。

1)吸引大规模社会性网络大众参与众包任务,可以获得大量新颖的创意和想法,拓宽了问题解决思路,多样化的专业技能可以应对关键性的技术难题,从而提高产品创新效率。传统产品设计模式的发展尽显疲态,群智设计利用大规模互联网业余设计群体不同的知识背景和专业能力,尤其是不同参与者对不同设计任务的差异化表现,为产品创新提供更加多元的设计思路和优质的设计方案。

2)群智设计利用大规模网络群体差异化的设计能力,能够快速、精准匹配个性化的用户需求。众包模式降低了设计参与门槛,有助于唤醒社会性设计资源的设计活力,依靠自主灵活的参与方式和组织机制,实现异质化网络群体精准匹配个性化用户需求,加快设计任务与参与者的耦合匹配,在满足动态非大众化用户需求以及提高设计效率方面具有独特的优势。

1.2 群智设计的关键要素与典型特征

作为一种互联网环境下新型的用户需求驱动的产品设计方法,群智设计利用群体智慧有效赋能设计创新。根据群智设计的设计特点及所处环境,总结了群智设计所包含的3个关键设计要素:多利益方、众包任务、群体资源,以及3个典型的设计特征:网络开放平台、需求驱动设计、群智赋能创新。群智设计的关键要素与设计特征之间的相互关系见图1。

网络开放平台是多利益方相互作用的基础,多利益方主要分为3类,即用户/需求者、互联网群体/参与者和平台管理员/组织者。开放复杂环境是群智设计的基本特征。Malone^[31]提出了一个群体智慧系统构建模块,该模块由两组相关问题“who—why”“what—

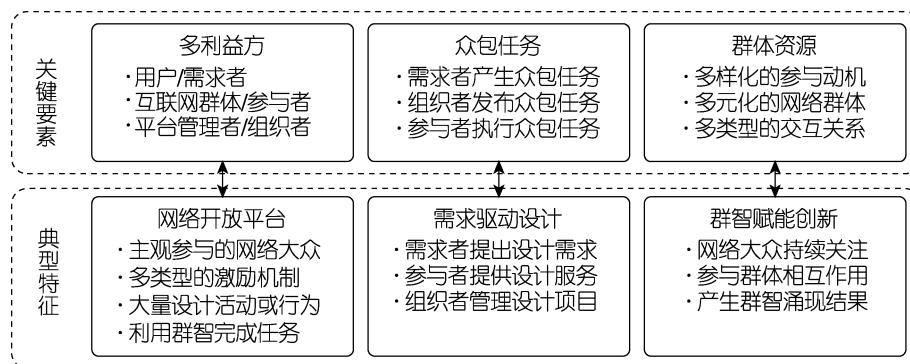


图 1 关键要素与设计特征之间的关联关系

Fig.1 Relationship between key elements and design characteristics

how”组成，回答了群智系统“谁来完成？”“为何要这么做？”“具体任务是什么？”以及“如何完成？”这四个问题。基于上述框架，将开放复杂环境的关键要素总结如下：在人员方面，平台组织者通过信息技术开发互联网开放式社区^[3]，将其作为一个产品设计服务交易平台，依靠自愿参与众包活动的大规模网络大众的知识和技能，完成用户在平台中发布的个性化产品需求。三者之间相互联系、相互作用，协调好三者之间的关系，才能促进平台的发展；在激励方面，激励机制可分为外在激励和内在激励。外在激励是指组织者通过竞赛、招标等形式设置一些奖金或荣誉来吸引参与者加入^[32]，此外，参与者也会因为兴趣爱好、提升技能、利他主义等内在动机自发地参与众包任务^[33]。组织者应该设计复合式的激励机制来吸引更多参与者；在任务方面，利益相关者是围绕用户需求展开合作的。众包任务是由用户需求转化而来的，也是平台存在的基础。平台中时刻进行着大量的设计活动。用户需求的数量和参与者的数量是平台可持续发展的第一要务；在执行方面，设计任务是由参与者来执行的，不同的设计任务，参与者的作用关系也不同，简单任务一般是竞争关系，复杂任务包括合作以及竞争性合作关系。

用户需求驱动设计是围绕众包任务展开的，众包任务由 3 个环节组成，即需求者提出个性化需求、组织者负责需求转化及任务发布、参与者执行众包任务。众包平台是依赖用户需求而构建的，平台中的一切活动都是围绕满足个体用户需求而展开的。用户需求驱动众包设计主要体现在 3 个方面：需求者提出设计需求。设计的起点是需求，设计是根据需求对目标进行建模的，使之满足用户需求中的要求，因此，用户需求是开展众包活动的前提；参与者提供设计服务。参与者是知识的载体。互联网分布式大众群体出于不同的动机参与众包活动，以其潜在的创造力为产品设计提供新的解决思路和方法，为众包平台的发展提供不竭的动力；组织者管理设计供求。需求者和参与者都是自发加入众包平台的，具有很强的随机性，组织者应该发挥统筹协调的作用，保障需求的供给以

及大众资源的利用率，维持设计服务的供需平衡，本质上是将用户需求与设计资源相匹配^[3]，以提高设计效率。

创新是设计的灵魂，群智设计与其他设计方法一样都力求做到产品创新，不同之处在于，群智设计利用群智赋能创新。群体智慧的产生包含 3 个要素：多样化的参与动机、多元化的网络群体、多类型的交互关系。群智设计是一个极其复杂、不断变化的动态过程，如果把众包开放平台看作是一个复杂的适应系统^[34]，那么该系统具备了 3 个显著特点：基于适应性主体、共同演化以及产生涌现现象。具有适应性的参与者造就了众包平台的复杂性，即适应性参与者主动与其他参与者进行随机交互（合作或竞争），同时自动调整自身状态以适应环境（比如用户需求、组织者），争取最大利益以延续自身生存，从正反馈中加强存在，共同演化，并在此过程中产生涌现现象，正是参与者的适应性造就了众包平台的复杂性。基于上述分析，群智赋能创新主要关注 3 个方面：网络大众持续涌入、参与群体相互作用、产生群智涌现结果。首先，网络大众依靠自身内在动机自愿参与众包活动，其结果具有很强的不确定性，组织者应该设计复合式激励机制吸引大规模的网络群体，为众包任务提供足够的潜在设计力量。其次，对于复杂众包任务，单个参与者的设计能力和创造力都是有限的，而大规模不同知识背景和专业技能的参与者的创新潜力是无穷的，尤其是当参与者之间进行密切交流时，大量创意的火花在知识和智慧不断碰撞的过程中迸发。最后，大规模群体交互的结果是群智的涌现。群体智慧创新设计是众包设计的核心要求。参与者智慧涌现分为 3 个步骤：群体数量涌现、大量交互行为和群体智慧涌现。群体数量涌现是基础，大量交互行为是必要环节，群智涌现的必然结果。群智涌现是产品创新的必然要求，也是群智设计的关键部分。

1.3 与其他典型产品设计方法比较

现代产品设计是一个以知识为基础，以新知识获取为核心的过程^[35]，涉及密集的迭代、复杂的推理以

及不同学科领域设计团队之间的相互合作^[36]。产品群智设计对现代产品设计而言是一种全新的发展方向。为了进一步深入认识群智设计, 本文选取了 8 个发展时间长、应用范围广的典型产品设计方法, 以群智设计的 3 个典型设计特征为基准与其进行横向比较, 具体分析结果见表 1。

表 1 群智设计与其他典型产品设计方法的比较
Tab.1 Comparison of collective intelligence design with other typical product design methods

典型特征	内涵	公理化设计	协同设计	功能-行为-结构	感性工学	模块化设计	质量功能展开	发明问题解决理论	以用户为中心
网络开放平台	主观参与的网络大众（网络大众）	-	-	-	-	-	-	-	-
	多类型的激励机制（参与动机和激励）	-	-	-	-	-	-	-	-
	大量设计活动或行为（设计活动和过程）	[37]	[38] [39]	[40] [41] [42]	-	[43] [44]	[45]	[46] [47]	-
	利用群智完成任务（群体（设计爱好者、设计师、专家）智慧）	-	[48] [49] [38]	-	-	[44]	[50] [51]	-	[52]
需求驱动设计	需求者提出设计需求（用户提出需求）	[53] [37]	[54]	[40]	[55] [56]	[43]	[57] [50] [58]	[59]	[52]
	参与者提供设计服务（网络大众参与设计交易）	-	[60]	-	-	-	-	-	-
	组织者管理设计项目（由组织者管控）	-	[60]	-	[61]	-	-	-	[52]
	网络大众持续关注（网络大众参与）	-	-	-	-	-	-	-	-
群智赋能创新	参与群体相互作用（参与者之间有交互）	-	[60] [38] [62] [48]	[36]	[61]	-	-	-	[52]
	产生群智涌现结果（群智涌现）	-	-	-	-	-	-	-	-

现有产品设计方法为产品设计的创新与发展发挥了巨大的作用, 在概念设计阶段、用户需求挖掘、需求到功能的转化方面等具有独到的优势, 尤其在不同的设计方法组合使用的情况下, 相互之间取长补短, 更能产生巨大的创造力, 值得进一步研究与应用。然而, 在开放式创新设计的背景下, 还有一些共同的局限性: 机械的设计流程, 现有产品设计方法的设计步骤和设计流程较为刻板, 缺乏敏捷的设计机制和高效的执行效率来灵活处理海量、动态、个性化的用户需求; 专业化的设计师, 传统的产品设计任务更多是由经验丰富的设计师或专家来完成的, 其专业水平和知识结构决定了设计创新的高度, 同时也限制了创新的宽度, 长此以往对产品创新设计不利; 固化的设计知识, 典型的产品设计方法大都以现有知识为基础, 难以突破创新设计的知识壁垒, 缺乏足够的创新力量来突破复杂产品设计的关键技术。

2 文献计量统计与分析

2.1 文献计量统计

学界对群智作用以及群智设计的认识显著扩大, 然而, 这一领域的发展趋势和热点尚不清楚。因此, 本节尝试从整体上把握设计领域中群智的相关研究方向及其具体的研究内容。融合调整前人文献综述的

相关研究工作^[63], 制定适合本文的系统文献综述。

1) 数据库选择。为了扩大检索范围, 确保能够检索到尽可能多的相关研究内容, 以便更好地挖掘群智设计相关研究的进展情况, 同时选择中英文数据库, 中文数据库选择知网、万方、维普, 英文数据库包括 Web of Science 和 Scopus。初步统计发现, 中文会议论文数量偏少且涉及医疗、教育、政治、文化等内容, 因此中文只选择期刊文献。选择 Web of Science 数据库核心合集集中的 Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)、Social Sciences Citation Index (SSCI)、Arts & Humanities Citation Index(A&HCI)、Conference Proceedings Citation Index–Science(CPCI-S)、Emerging Sources Citation Index (ESCI) 等 5 个引文索引。

2) 数据检索。通过初步的统计分析, 目前很少有相关研究提出“群智设计”这一术语, 中英文互译差异派生出不同的语义, 为了从数据库中检索有价值的文献, 将出现过的相关关键词都包含在内, 使检索结果更全面。时间跨度为 2000-01-01 至 2021-11-07。中文以“群体”“集体”和“智慧”“智能”为两两组合, 英文以“collective”“crowd”“group”与“intelligence”“wisdom”分别组合, 语种为英语, 检索类型为 article (包括 review) 与 conference。数据检索条件见表 2。

表 2 数据检索条件
Tab.2 Data retrieval condition

检索词	数据库	检索范围	来源类别	检索类型
(群体智慧 OR 群体智能 OR 集体智慧 OR 集体智能) AND (设计)	知网	主题	SCI、EI、北大核心、SSCI、CSCD	期刊文献
	万方	主题	核心期刊	期刊文献
	维普	主题	北大核心、EI、SCIE、CSCD、CSSCI	期刊文献
(collective intelligence OR collective wisdom OR crowd intelligence OR crowd wisdom OR wisdom of crowds OR wisdom of the crowd OR group intelligence OR group wisdom OR wisdom of groups) AND (design)	Web of Science	Title、Abstract、Keywords	SCI-EXPANDED、SSCI、A&HCI、CPCI-S、ESCI	Article、Conference Paper
	Scopus	Title、Abstract、Keywords	Scopus	Article、Conference Paper

3) 数据筛选。统计了计算机科学、控制系统、管理科学、机械工程、信息科学等相关工程技术和信息技术领域的相关文献，舍弃了政治、生物、医学、教育等与设计相关度较低的领域。

4) 数据分析。选择 Excel、FineBI 和 VOSviewer 进行文献计量统计与分析。其中，Excel 用于数据统计与处理，FineBI 和 VOSviewer 作为数据分析工具。FineBI 是国内专业的大数据商业智能和分析平台，凭借简单流畅的操作、强劲的大数据性能和自助式分析体验得到业界的青睐与认可。VOSviewer 是一种用于构建可视化文献计量网络的软件工具，其内置的分析工具可满足中、英文文献计量分析，基于引文分析、书目耦合、共现分析构建作者、关键词、期刊等可视化网络，有助于更好地把握研究趋势。VOSviewer 可以直接基于 Web of Science 和 Scopus 文件创建可视化分析网络。

2.2 文献分析

本文共检索了中文文献 886 篇，英文文献 2 000 篇，包含 1 133 篇 Article，867 篇 Conference Paper。

1) 描述性分析。将历年国内外文献发表数量进

行折线统计发现，与群智设计相关研究文献的发文量逐年递增，表明这一研究领域方兴未艾，一直受到学界的关注和讨论，见图 2。对英文文献进行热力地图绘制，中国、美国是相关领域研究发表文章最多的国家，中欧及西亚是相关领域研究发表文章最多的地区，见图 3。

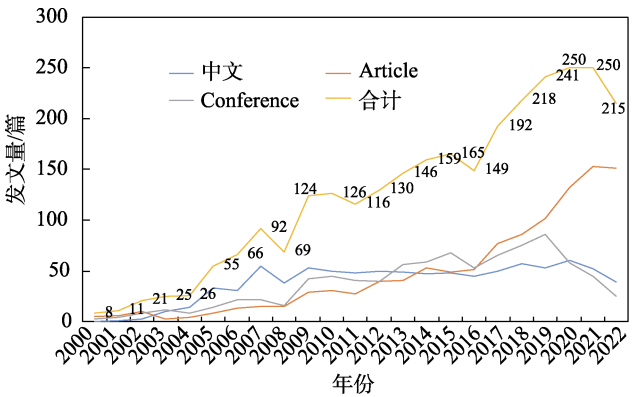
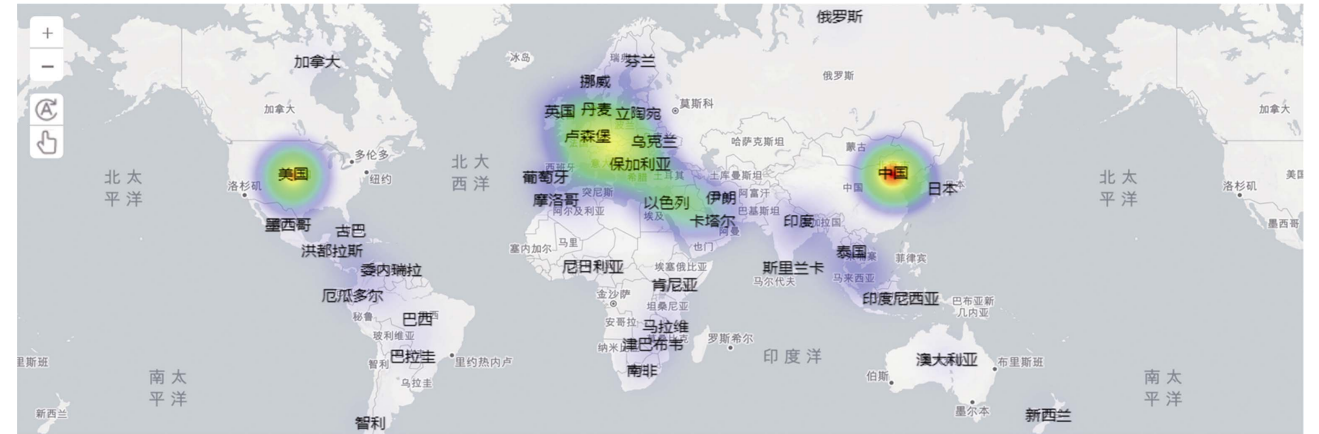


图 2 2000 年至 2022 年国内外发文数量
Fig.2 Line chart of the number of papers issued in China and abroad from 2000 to 2022

组件



☐ 查看所有数据①

图 3 英文文献发表热力地图
Fig.3 Thermal map of English literature published

2) 内容分析。利用 VOSviewer 的关键词共现分析工具对 886 篇中文文献进行分析。设置关键词出现的最少次数为 3, 同时剔除连接强度小、没有实际含义的离散值, 得到 401 个有效关键词。中文关键词共现网络见图 4。

中文文献关键词共现网络共分为 5 个聚类, 按聚类大小分为群体智能 (红色)、进化算法 (绿色)、优化算法 (蓝色)、粒子群优化 (黄色)、众包 (紫色), 可以总结概括为智能体群体智慧及其各种相关算法、人类集体智慧。红色和蓝色聚类聚焦动物群体智慧, 主要从动物群体行为中发现不同的优化算法和进化

算法。绿色和黄色聚类将动物群智算法应用于无人机、多 Agent 系统、复杂系统等领域, 进行路径规划、智能控制、检测等研究分析。紫色聚类集中于人类群体智慧, 研究知识管理和共享、群智创新、群决策、产品设计等设计行为与内容, 大数据、知识社区、维基百科、开放式创新等都与众包密不可分。

英文文献关键词共现网络同样分为 5 个聚类, 依次是 collective intelligence (红色)、design (绿色)、swarm intelligence (蓝色)、multi-agent systems (黄色)、web 2.0 (紫色), 见图 5。红色聚类有 4 个连接度最强的关键词: collective intelligence、artificial



图 4 886 篇中文文献关键词共现网络

Fig.4 Co-occurrence network of key words in 886 Chinese literature

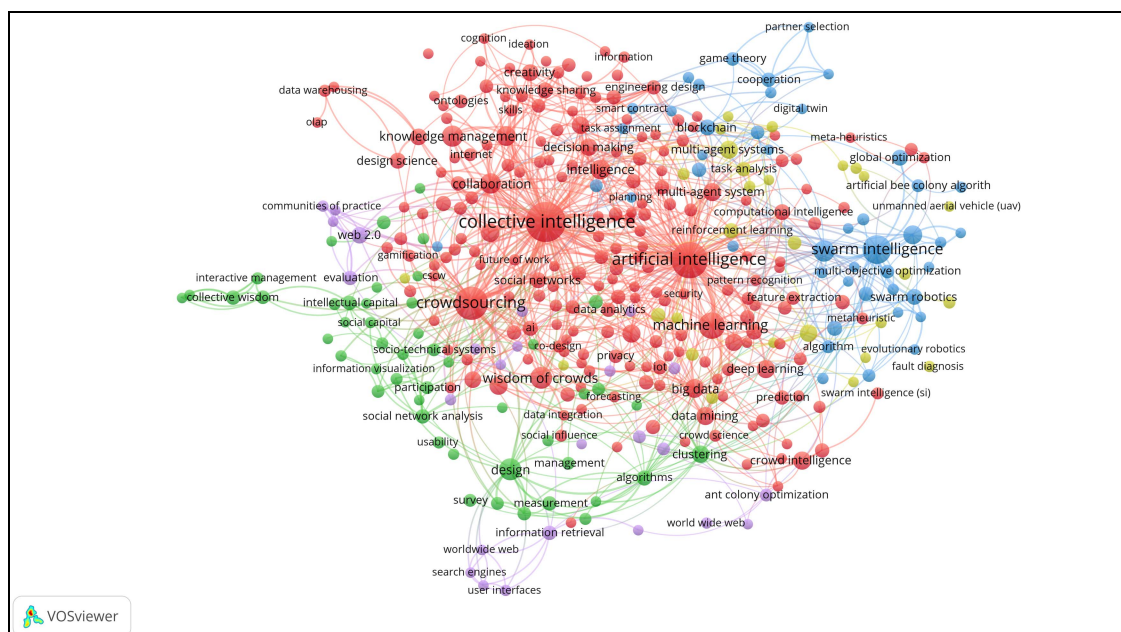


图 5 2 000 篇英文文献关键词共现网络

Fig.5 Co-occurrence network of key words in 2000 English literature

intelligence、crowdsourcing、machine learning，研究内容围绕这 4 个关键词分别开展协同设计与决策、数据挖掘与多 Agent 系统、社会网络与设计方法、人群智慧与深度学习。绿色聚类以设计为中心探讨人群智慧在智慧城市、企业管理及开放式设计等方面的应用。蓝色聚类研究动物群体智能，包括相关进化和优化算法，相应地在区块链、数字孪生、智能机器人等领域都有应用。黄色聚类应用于多 Agent 系统、机器人及其感知系统、网络拓扑学等领域。紫色聚类最小且较为零散，在 web 2.0、电子学习、用户交互、知识工程等领域都有涉及。整体而言，红色聚类是研究

最广、研究最深的内容，以人类群智为核心，在人工智能、人机联合、社会计算等领域有广泛的讨论。

图 6 显示了近十年群智设计研究关键词的研究趋势。紫色表示出现时间较早，红色则较晚。由图 6 可知，英文文献主要围绕人类群智、动物群智和人工智能展开研究，相关话题一直被讨论，由颜色变化趋势可知，关注点逐渐由机器学习、大数据分析转向算法优化、设计方法，又回到人类群智的相关研究。中文文献整体围绕群体智能，包括人类、动物和非生物智能展开研究，研究方向主要为群智创新、众包以及各种群智算法等领域。

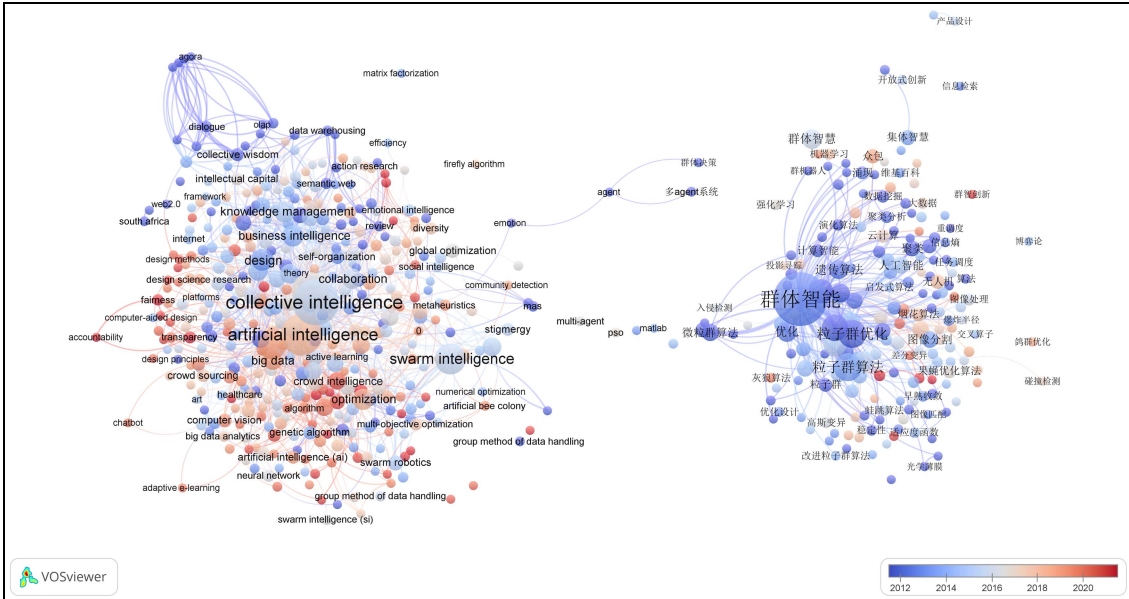


图 6 关键词标签视图
Fig.6 Overlay visualization of key words

3 群智设计研究进展

3.1 群智设计类型研究

综合分析众包平台或开放社区后发现，不同的平台有其鲜明的设计理念和特点，平台的目标与初衷直接决定了个性化用户需求的类型和特征，间接决定了设计任务的类型。从参与群体的规模、设计需求的复杂度、设计任务的创新度等方面进行分析，可以将群智设计分为 3 种类型：设计服务交易型群智设计、复杂协作创新型群智设计、核心技术突破型群智设计，见图 7。

1) 设计服务交易型群智设计。互联网上一些开放平台或开源社区源源不断吸引大量用户持续参与和讨论，每个用户都有自己的诉求，平台上充斥着海量非大众化的用户需求，如网页设计、LOGO 设计，此类需求通常呈现出设计工期短、工作量小、设计难度低、个性化程度高等特点。一些开放式平台力求满

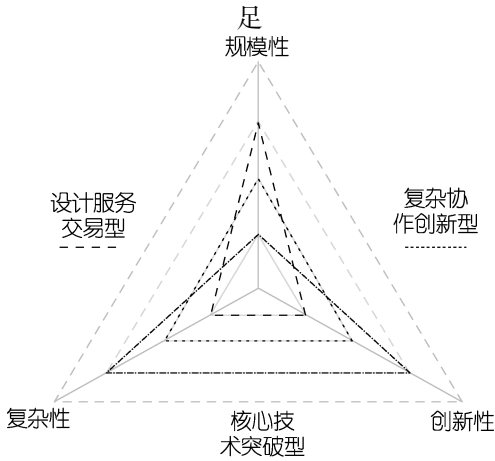


图 7 群智设计 3 种分类
Fig.7 Three types of collective intelligence design

用户多样化、个性化的设计需求，致力于打造以设计服务交易为主的众包平台，通过计件式、招标式的激励方式汇聚海量设计爱好者，使其提供定制化的创意和

服务, 设计成员之间常以竞争为主要参与方式, 与需求用户达成服务交易协议, 获得相应报酬, 实现双赢。典型的应用平台包括亚马逊土耳其机器人 (Amazon Mechanical Turk, AMT)、猪八戒网等。

2) 复杂协作创新型群智设计。复杂产品方案设计常面临诸多挑战, 需要创新来完成研发, 设计任务难度大、研发成本高、技能要求多, 需要不同专业方向的高技能人才协作参与。一些企业利用众包平台, 采用大赛或雇佣的方法来吸引并筛选具有相应技术要求的合适人才。多学科、多角色的设计成员之间各自独立又相互协作, 各种解决方案不断碰撞、融合、评估, 加速了设计方案的生成。Local Motors 平台通过开放式创新将群智应用到汽车设计中, 研发了一辆名为 Rally Fighter 的越野车以及世界第一辆 3D 打印智能巴士 Olli。Thinkgiverse 建立了一个全球最大的 3D 打印设计、创造、共享的开源环境, 鼓励用户之间共享 3D 打印设计模型, 共同创新设计^[64]。

3) 核心技术突破型群智设计。创新对大型制造企业新产品研发来说有着非凡的意义, 由于企业自身的局限性, 有时难以突破产品研发过程中的核心技术难题, 企业产品研发面临众多重大关键核心技术攻关。因此, 企业将开放式创新理念与众包模式相结合, 构建企业开放式创新研发平台, 加大关键核心技术突破与颠覆性技术创新的力度, 通过悬赏、讨论等方式集中群智优势, 加快灵感、想法、知识、技术的融合, 激发群智能量, 加速科技成果向生产力转化。海尔 HOPE 平台聚焦关键核心技术, 重视前沿技术布局, 通过汇聚群智, 突破研发瓶颈, 实现颠覆性产品快速研发与迭代, 提升行业领先优势。

3.2 群智设计层次模型

罗仕鉴^[26]将群智设计分为本体、行为和价值 3 个层次, 本体层关注设计方案生成与迭代, 行为层强调用户体验, 价值层关注文化内涵与情感共鸣。与此不同, 本文从平台系统、群智作用、个体行为等角度, 将群智设计分为宏观层、中观层、微观层 3 个层次, 见图 8。

1) 宏观层。宏观层从平台系统角度整体把控各相关利益方、激励机制、需求网络、任务体系、知识网络、方案网络、技术体系等要素。各相关利益方持续关注并积极参与众包平台中的各种设计活动和行为活动。大量用户根据自身需要不断在平台中发布各类需求, 按相似度进行划分并逐渐聚集形成需求网络。在平台持续的激励作用下, 多学科、多类型、多技能的大规模设计人才不断涌入, 相互作用的同时涌现出群体智慧, 迸发新的知识和智慧, 形成多层次的知识网络。由需求网络转化而来的任务体系对接知识网络, 知识网络通过对任务体系的直接作用生成方案网络。所有行为活动和设计活动都需要在信息通讯、

数据管理与处理、综合建模与分析、信息安全等技术的支撑下进行, 才能协调执行平台系统的各项活动, 保障平台系统的良性发展。

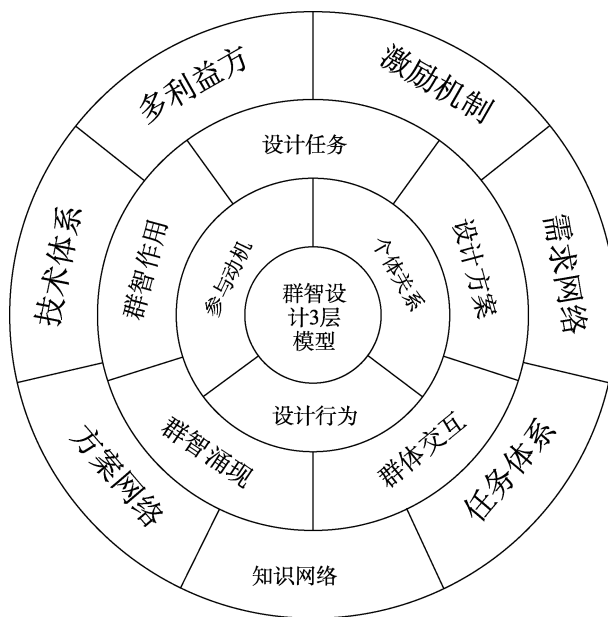


图 8 群智设计 3 层模型

Fig.8 Three-hierarchical model of collective intelligence design

2) 中观层。中观层以单个产品设计过程为主线, 包括设计任务的拆解、设计方案的生成、群体交互、群智涌现及群智作用。单一需求不用进行拆解可直接转化为设计任务, 反之, 复杂产品需求的不同功能和结构之间存在强关联关系, 且设计要求高、设计任务重, 需要进行拆解, 切断弱关联结构和功能之间的联系, 按照一定的分割标准将需求进行分包处理, 不同类型的任务由不同技能参与者独立或协作完成, 生成合适方案后再进行整合。群体涌现对执行简单设计任务来说是基础要求, 群智涌现对创新型任务而言是重要环节, 而大量群体积极参与, 并进行有效的交互才是群智涌现的关键。对群智涌现结果进行合理控制与筛选, 可以更有效地提高创新效率。

3) 微观层。微观层关注参与者个体层面, 包括个体的参与动机、相互之间的交互关系以及个体层面的设计行为。个体参与众包任务的动机主要有两种。外在激励的金钱手段有一定的强制性, 比如招标制就有一定的交易协议, 不能随意退出。内在激励需要个体参与者有强烈的冲动和欲望, 否则容易受到个人心理状态的转变以及外部诱惑的干扰, 内在激励的不稳定性及不确定性严重影响设计进度和任务执行。个体参与不同类型的任务有不同的交互方式, 决策性设计任务需要参与者共同执行, 如参与选举、投票等任务的个体之间相互合作; 某些创意性设计任务需要参与者单独完成, 如大赛、招标等方式的独立任务需要有能力的参与者进行竞争; 创新型设计任务需要参与者

合作完成,如复杂产品设计任务。根据不同类型的设计任务的需要,合理管理和组织参与者,可以有效提高设计效率。参与者的设计行为随着参与动机和任务类型适时而变。

4 群智设计未来发展的挑战

随着众包模式的不断应用,开放平台、用户需求、设计群体三元融合发展,群智设计的研究更加广泛与健全,在设计任务的高效执行、设计人员的有效组织、设计过程的强化管控等方面需持续深入研究。

4.1 群智设计任务体系的构建方法

群智设计是从满足用户需求、面向设计任务开始的,需求类型和执行难度直接决定设计任务的转化,间接影响设计任务与设计群体的匹配及其执行效果,如何系统、合理地划分设计任务,形成易执行、低耦合、强关联的细粒度任务颗粒,是群智设计首要解决的问题。在群智设计系统中,复杂产品需求不易整体分包,需要根据群智聚集及其涌现类型,建立恰当的划分标准与分包方法,确保设计任务向细粒度转化并与相应的群智匹配,构建关联任务融合机制,系统实现任务体系的构建。

4.2 群智设计参与群体的组织管理

设计参与者是群智设计得以维系的重点要素,成员的自主性、灵活性、多样性、专业性都会影响设计进程,如何有效利用群智及其涌现结果是群智设计亟待解决的难题。在不同类型的开放平台中,根据不同的需求性质和任务目标,建立网络化、复合式的激励机制,刺激群智不断涌现,识别并划分相应类型的群体角色,建立群智与任务的匹配机制,精准、高效利用群智涌现结果,实现对参与群体、群体激励、群智涌现的控制与管理。

4.3 群智设计动态过程的管控优化

群智设计是一个复杂、动态、多交互、可调节的动态过程,以设计方案的演化与生成为主线,贯穿整个设计进化过程,根据设计过程的实时状态,动态调节各关键要素之间的配合是群智设计研究的一个挑战。在群智设计空间中,需要建立网络化管控机制,构建融合参与群体、任务体系、知识网络、设计方案等要素的综合模型,根据不同时刻、不同状态下设计方案的实时进展,动态调整并优化各要素之间的结构和布局,实现人、智、物三元的协调配合。

5 结语

群体智慧是一个历久弥新的研究方向,国内外学者对群智概念已进行了深入探讨,取得了丰富的研究成果,促进了创新设计、智能算法、社会网络、人工

智能等多个领域的研究与发展。本文提出了群智设计的定义,提出了群智设计的关键要素和典型特征,与典型产品设计方法进行了比较。查询了近年来国内外群智设计的研究成果,对群智设计研究热点进行了分析,提出了3种群智设计类型,并构建了群智设计层次模型,最后探讨了群智设计未来的发展挑战。

参考文献:

- [1] 习近平. 中国共产党第十九次全国代表大会[R]. 北京: 全国人民代表大会常务委员会, 2017.
XI Jin-ping. The 19th National Congress of the Communist Party of China[R]. Beijing: the Standing Committee of National People's Congress, 2017.
- [2] 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. Crowdsourcing Design Theory and Key Technology Development[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(9): 2650-2665.
- [3] 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.
- [4] CHESBROUGH H. The Era of Open Innovation[J]. MIT Sloan Management Review, 2003, 44(3): 35-41.
- [5] SAEBI T, FOSS N J. Business Models for Open Innovation: Matching Heterogeneous Open Innovation Strategies with Business Model Dimensions[J]. European Management Journal, 2015, 33(3): 201-213.
- [6] 宋刚, 唐蕾, 陈锐, 等. 复杂性科学视野下的科技创新[J]. 科学对社会的影响, 2008(2): 28-33.
SONG Gang, TANG Qiang, CHEN Rui, et al. Scientific and Technological Innovation from the Perspective of Complexity Science[J]. Impact of Science on Society, 2008(2): 28-33.
- [7] HOWE J. Crowdsourcing: Why the Power of the Crowd is Driving the Future of Business[M]. New York: Three Rivers Press, 2009.
- [8] LIU Ang, LU S C Y. A Crowdsourcing Design Framework for Concept Generation[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 177-180.
- [9] DE BEER J, MCCARTHY I P, SOLIMAN A, et al. Click here to Agree: Managing Intellectual Property when Crowdsourcing Solutions[J]. Business Horizons, 2017, 60(2): 207-217.
- [10] ZHANG Xiang, XUE Guo-liang, YU Ruo-zhou, et al. Countermeasures Against False-Name Attacks on Truthful Incentive Mechanisms for Crowdsourcing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(2): 478-485.
- [11] CHEN Jian, MO Rong, CHU Jian-jie, et al. Research on the Optimal Combination and Scheduling Method of

- Crowdsourcing Members in a Cloud Design Platform[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(3): 095440541985587.
- [12] HU Qin, WANG Sheng-ling, MA Pei-zi, et al. Quality Control in Crowdsourcing Using Sequential Zero-Determinant Strategies[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2020, 32(5): 998-1009.
- [13] 江平宇, 杨茂林, 李卫东, 等. 集体智慧研究综述及其社群化制造应用探索[J]. 中国机械工程, 2020, 31(15): 1852-1865.
- JIANG Ping-yu, YANG Mao-lin, LI Wei-dong, et al. CI Literature Review and Its Application Exploration in Social Manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(15): 1852-1865.
- [14] THONGSAMOUTH O. An Approach to the Differences between Artificial and Human Intelligence[J]. SSRN Electronic Journal, 2016: 1-8.
- [15] GRIMON F, MEZA J, VACA-CARDENAS M, et al. Research and Trends in the Studies of Collective Intelligence from 2012 to 2015[J]. EAI Endorsed Transactions on e-Learning, 2017, 4(14): 152905.
- [16] SUROWIECKI J. The wisdom of crowds[M]. New York: Anchor Books, 2005
- [17] 刘海鑫, 刘人境. 集体智慧的内涵及研究综述[J]. 管理学报, 2013, 10(2): 305-312.
- LIU Hai-xin, LIU Ren-jing. A Review on Collective Intelligence Research and Its Connotation[J]. Chinese Journal of Management, 2013, 10(2): 305-312.
- [18] 戴旸, 周磊. 国外“群体智慧”研究述评[J]. 图书情报知识, 2014(2): 120-127.
- DAI Yang, ZHOU Lei. Literature Review on Collective Intelligence in Foreign Countries[J]. Documentation, Information & Knowledge, 2014(2): 120-127.
- [19] 靖鲲鹏, 王佳岐. 国外“群集智慧智能”研究进展与展望[J]. 高技术通讯, 2018, 28(8): 700-711.
- JING Kun-peng, WANG Jia-qi. Research Development and Prospect of Swarm/Collective Intelligence in Foreign Countries[J]. Chinese High Technology Letters, 2018, 28(8): 700-711.
- [20] LEE J Y, JIN C H. How Collective Intelligence Fosters Incremental Innovation[J]. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 2019, 5(3): 53.
- [21] YUN J J, JEONG E, ZHAO Xiao-fei, et al. Collective Intelligence: An Emerging World in Open Innovation[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4495.
- [22] 罗仕鉴. 群智创新: 人工智能 2.0 时代的新兴创新范式[J]. 包装工程, 2020, 41(6): 50-56.
- LUO Shi-jian. Crowd Intelligence Innovation: A New Innovation Paradigm in the AI 2.0 Era[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(6): 50-56.
- [23] 梁存收, 罗仕鉴, 房聪. 群智创新驱动的信息产品设计 8D 模型研究[J]. 艺术设计研究, 2021(6): 24-27.
- LIANG Cun-shou, LUO Shi-jian, FANG Cong. Research on 8D Model of Digital Product Design Driven by Crowd Intelligence Innovation[J]. Art & Design Research, 2021(6): 24-27.
- [24] 石丽雯, 郭伟, 张静, 等. 群智项目创新潜力的影响因素研究[J]. 包装工程, 2021, 42(24): 13-21, 72.
- SHI Li-wen, GUO Wei, ZHANG Jing, et al. Factors Impacting Innovation Potential in Crowd Intelligence Project[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(24): 13-21, 72.
- [25] 王磊, 马龙江, 彭巍, 等. 群智创新社区用户创新能力分析[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(18): 42-47.
- WANG Lei, MA Long-jiang, PENG Wei, et al. Research on the Innovation Ability of Online Users in Crowd Sourcing Innovation Community[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2018, 35(18): 42-47.
- [26] 罗仕鉴. 群智设计新思维[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 121-127.
- LUO Shi-jian. New Thought of Crowd Intelligence Design[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(3): 121-127.
- [27] 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.
- [28] ZHANG Wei, MEI Hong. A Constructive Model for Collective Intelligence[J]. National Science Review, 2020, 7(8): 1273-1277.
- [29] 冯小亮. 基于双边市场的众包模式研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- FENG Xiao-liang. Crowdsourcing Mode Research Based on Two-sided Market[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [30] 王姝. 网商平台众包模式的协同创新研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- WANG Shu. Crowdsourcing Business Model by Collaborative Innovation Based on Website Platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [31] MALONE T W, LAUBACHER R, DELLAROCAS C N. Harnessing Crowds: Mapping the Genome of Collective Intelligence[J]. SSRN Electronic Journal, 2009: 1-20.
- [32] 王娟, 王丽清, 马文倩, 等. 群智协同激励机制研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(6): 1-9.
- WANG Juan, WANG Li-qing, MA Wen-qian, et al. Survey on Incentive Mechanisms for Crowd-Based Cooperative Computing[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(6): 1-9.
- [33] SURAN S, PATTANAIK V, DRAHEIM D. Frameworks for Collective Intelligence: A Systematic Literature Review[J]. ACM Computing Surveys, 2021, 53(1): 1-36.
- [34] HOLLAND J H. Hidden order: how adaptation builds complexity[M]. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995
- [35] 谢友柏. 现代设计理论和方法的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 1-9.
- XIE You-bai. Study on the Modern Design Theory and Methodology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 1-9.
- [36] YAN Xi-qiang, LI Yan, CHEN Jian, et al. A Method of

- Implementing Formalized Multidisciplinary Collaboration in Product Conceptual Design Process[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(18): 3342-3357.
- [37] DELARAM J, FATAHI VALILAI O. An Architectural View to Computer Integrated Manufacturing Systems Based on Axiomatic Design Theory[J]. *Computers in Industry*, 2018, 100: 96-114.
- [38] LIAO Kai-ji, LUO Jun-qin. Knowledge Management in Collaborative Product Design-an Activity Theory Perspective[J]. *Journal of Software*, 2012, 7(1): 17-24.
- [39] KVAN T. Collaborative Design: What is It?[J]. *Automation in Construction*, 2000, 9(4): 409-415.
- [40] CASCINI G, FANTONI G, MONTAGNA F. Situating Needs and Requirements in the FBS Framework[J]. *Design Studies*, 2013, 34(5): 636-662.
- [41] CHRISTOPHE F, BERNARD A, COATANÉA É. RFBS: A Model for Knowledge Representation of Conceptual Design[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 155-158.
- [42] GERO J S, KANNENGIESSER U. The Situated Function-Behaviour-Structure Framework[J]. *Design Studies*, 2004, 25(4): 373-391.
- [43] BAI Zhong-hang, ZHANG Shan, DING Man, et al. Research on Product Innovation Design of Modularization Based on Theory of TRIZ and Axiomatic Design[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(12): 168781401881408.
- [44] GU P, SOSALE S. Product Modularization for Life Cycle Engineering[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1999, 15(5): 387-401.
- [45] SHIN J S, KIM K J. Complexity Reduction of a Design Problem in QFD Using Decomposition[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2000, 11(4): 339-354.
- [46] WANG Yu-hui, LEE C H, TRAPPEY A J C. Modularized Design-oriented Systematic Inventive Thinking Approach Supporting Collaborative Service Innovations[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, 33: 300-313.
- [47] JIA Wei-jie. Research and Application of Mechanical Product Design Process Based on QFD and TRIZ Integration[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1544(1): 012088.
- [48] DU Xing, JI Tie, HU Ying. How to Cooperate in Collaborative Design: A Study of Interactive Behaviours at Different Design Capability Levels[J]. *The Design Journal*, 2020, 23(3): 351-374.
- [49] CHEN Liang, WANG Wei, HUANG Bin. A Negotiation Methodology for Multidisciplinary Collaborative Product Design[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2014, 28(4): 469-478.
- [50] ALTUNTAS S, ÖZSOY E B, MOR Ş. Innovative New Product Development: A Case Study[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 158: 214-221.
- [51] GHIYA K K, TERRY BAHILL A, CHAPMAN W L. QFD: Validating Robustness[J]. *Quality Engineering*, 1999, 11(4): 593-611.
- [52] CHAMMAS A, QUARESMA M, MONT'ALVÃO C. A Closer Look on the User Centred Design[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 3: 5397-5404.
- [53] SUH N P. Ergonomics, Axiomatic Design and Complexity Theory[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2007, 8(2): 101-121.
- [54] WANG Ya-hui, YU Sui-huai, XU Ting. A User Requirement Driven Framework for Collaborative Design Knowledge Management[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2017, 33: 16-28.
- [55] DOU Run-liang, LI Wei, NAN Guo-fang, et al. How Can Manufacturers Make Decisions on Product Appearance Design? A Research on Optimal Design Based on Customers' Emotional Satisfaction[J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2021, 6(2): 177-196.
- [56] NAGAMACHI M. Kansei Engineering: A New Ergonomic Consumer-oriented Technology for Product Development[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1995, 15(1): 3-11.
- [57] WANG Huan, FANG Zhi-geng, WANG Da-ao, 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.
- [58] VAN DE POEL I. Methodological Problems in QFD and Directions for Future Development[J]. *Research in Engineering Design*, 2007, 18(1): 21-36.
- [59] MANN D. An Introduction to TRIZ: The Theory of Inventive Problem Solving[J]. *Creativity and Innovation Management*, 2001, 10(2): 123-125.
- [60] FLECHE D, BLUNTZER J B, AL KHATIB A, et al. Collaborative Project: Evolution of Computer-Aided Design Data Completeness as Management Information[J]. *Concurrent Engineering*, 2017, 25(3): 212-228.
- [61] FENECH A, FRANCALANZA E, AZZOPARDI M A, et al. Kansei Engineering over Multiple Product Evolution Cycles: An Integrated Approach[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 84: 76-81.
- [62] SHEN Wei-ming, HAO Qi, LI Wei-dong. Computer Supported Collaborative Design: Retrospective and Perspective[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(9): 855-862.
- [63] KARIMI TAKALO S, SAYYADI TOORANLOO H, SHAHABALDINI PARIZI Z. Green Innovation: A Systematic Literature Review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 122474.
- [64] ÖZKIL A G. Collective Design in 3D Printing: A Large Scale Empirical Study of Designs, Designers and Evolution[J]. *Design Studies*, 2017, 51: 66-89.