

复杂系统的设计认知和创新

胡洁, 陈斌, 朱琳

(上海交通大学, 上海 200240)

摘要: **目的** 研究复杂系统设计过程中设计师的设计认知和设计创新行为。**方法** 通过国内外相关文献的研究和分析, 总结归纳复杂系统设计问题界定和解决方案构思的认知过程、复杂系统创新设计构思的生成机制、复杂系统的创新设计策略, 分析复杂系统设计认知和创新研究领域将发生的变革和未来发展的趋势。**结论** 系统探讨了复杂系统设计认知与创新过程中的设计问题界定和解决方案构思的联合演化机制、给定和自发性解决方案示例, 给设计师带来的认知固化和类比推理创新启发作用、结构化和机会主义的创新设计策略, 发现当下的复杂系统创新设计理论和实践研究, 还需要进一步开展跨学科知识融合激励的复杂系统创新设计研究, 与此同时, 加强关于设计师主观认知不确定性的定量建模研究, 从而更好、更有针对性地探究复杂系统创新设计中认知过程的自然本质。

关键词: 复杂系统; 设计认知; 创新策略; 问题归约; 解决方案构思; 多学科设计示例

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)02-0005-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.02.002

Design Cognition and Innovation of Complex Systems

HU Jie, CHEN Bin, ZHU Lin

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The work aims to study the design cognition and innovation of complex systems. Through research and analysis on related literature at home and abroad, the cognitive process of defining complex system design problem and ideation of solutions, creative conception generating mechanism and innovative design strategy were summarized and the change and development of complex system's design cognition and innovation were analyzed. Under the environment of complex system's design recognition and innovation, the co-evolution of problem definition and solution ideation, cognitive fixation and creative inspiration of given and self-generated solution examples, and structured and opportunistic design strategy are discussed systematically. According to the relevant researches, it is proposed that more researches about multi-disciplinary-knowledge-inspired creative design mechanism should be taken, and more attentions should be directed to the quantitative modeling of subjective cognitive uncertainty, so that, the cognitive nature of complex system's innovative design could be studied better and more targeted.

KEY WORDS: complex system; design cognition; innovative strategy; problem reduction; solution ideation; multi-disciplinary design example

复杂系统的创新设计是内在设计需求驱动和外在设计知识激励的面向解决方案构建和完善的正向设计过程。一方面, 设计师需要对复杂的设计问题本身具有清晰的认识, 这是一种认知体系的架构过程,

需要设计师综合运用各种设计方法论并结合自身的设计经验实现设计问题从抽象到具体的逻辑分级和分解; 另一方面, 设计师需要在已有设计问题界定的认知基础上, 综合考虑多学科设计知识的相互融合的

收稿日期: 2020-08-22

基金项目: 国家社科基金重大项目(17ZDA020): 设计形态学研究; 上海市哲学社会科学规划教育学一般项目(A2007)

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

可能性,从而能够创新性地逐步构思出物理结构组成复杂、系统行为复杂多变的复杂系统设计的解决方案。在复杂系统的设计过程中,设计师的设计认知和创新构思过程相互交织、密不可分,与此同时,两者的进程通常具有迭代往复的属性,随着设计进程不断联合演进。可以说复杂系统的设计认知和创新过程共同构成了一个密不可分的整体,其本身也是一个极度复杂的多因素复杂时变系统。近年来,关于复杂系统的设计认知和创新方面的研究方兴未艾,在设计问题界定和解决方案构思中的设计认知过程、创新设计构思的生成机制、认知归约策略和机会主义创新策略方面取得了不少进展。接下来,本文将分别就这三个研究方向对这些研究进行梳理和分析。

1 设计问题界定和解决方案构思中的设计认知过程

1.1 设计师进行设计问题界定时的个体差异

复杂系统的设计认知始于设计问题的界定,学界内有许多研究工作的焦点都集中在设计师进行设计问题界定时的个体行为和策略的差异之上,其中最重要的一点就是专业设计师和新手设计师之间的差别。例如 Christiaans 和 Dorst^[1]观察到低年级的设计学院学生更倾向于尽量少地收集给定设计问题的相关信息,从而无法对设计问题的关键约束和主要设计难点形成完整的认知。在这种认知背景下,他们试图解决的复杂系统设计问题实际上是真实给定设计问题的简化版。相比之下,高年级设计学院学生在设计问题界定上的行为策略,则可以进一步被分为两个类型:第一类学生倾向于陷入对给定设计问题相关信息的广泛收集当中,容易阻碍解决方案的产生;第二类学生则倾向于收集更少但更有效的相关信息,从而能够更为成功地生成高质量的解决方案。

在随后的一项关于工程设计学院学生的调查当中,Atman 等人^[2]考察了缺乏设计经验的低年级学生和具有更多设计经验的高年级学生在解决复杂系统设计问题方面的差异。他们发现新手设计师当中,一部分人习惯花费大量的时间用于设计问题的界定,而另一部分人则倾向于在设计问题界定的工作中花费较少的时间。前者生成的解决方案往往较后者更差,这似乎是因为前者更容易陷入设计问题界定的工作中而止步不前。专业设计师则不仅仅在设计问题界定上考虑得更为广泛周全,还在信息收集和假设约定上更具针对性和有效性,从而使他们能够生产出更为优秀的设计方案。

总的来说,研究表明在设计问题的界定上,不同设计师之间存在着明显的个体差异,成功的设计师往往能够花费足够且有效的用于收集设计问题的相关信息,进而能够更精确地定义出设计目标和设计

约束,而不是花费过多徒劳的时间用于解决那些无关紧要的设计问题。这种在设计问题界定中的不同的策略性似乎与设计师的经验相关联,一个设计师可以通过后天的设计经验积累,逐步熟练地理解如何更好地平衡设计问题的界定和解决方案的开发这两个过程,从而能够更成功地完成设计任务。目前的研究对设计师的这种自我认知监控过程的自然本质的认识还并不深入,只知道它是驱动设计师就继续进行设计问题界定还是跳转进入解决方案开发的这一问题作出决策的关键因素。

1.2 解决方案的猜想、构思和设计问题的构造

关于设计问题界定个体差异方面的研究表明,适度的设计问题界定活动对于复杂系统设计的成功十分重要,而从这一活动快速地跨入到解决方案的开发活动也同样十分重要。有研究表明,解决方案的猜想和构思通常能够很好地帮助设计师完善设计问题的界定,有效地帮助设计师明晰对复杂系统设计问题的理解。Darke^[3]的一项针对专业建筑师的研究显示,他们以一种“初级生成器”的方式产生初步的解决方案猜想和构思,从而指导设计师进一步开辟出一条通向复杂系统工程设计问题的道路。于此同时,这种产生初步解决方案猜想和构思的策略,也能够让建筑师通过测试了解初步解决方案是否妥善和适当,来更为深入地探索和理解设计问题,Lloyd 和 Scott^[4]也在他们关于复杂建筑设计领域的研究中得出了类似的结论。

以解决方案的猜想和构思为导向的设计认知方法,有利于复杂系统设计过程的开展,这是因为只有脑中拥有一个解决方案的雏形,才可以言之有物地让设计师进一步考察它是否能够契合复杂系统设计问题所涉及到的各种错综复杂的需求和约束。这个过程可以揭示设计信息的缺失和设计信息之间,不能相互衔接与兼容的状态,从而提醒设计师及时通过咨询客户或进行一些可行的假设约定,来进一步明晰这些必要的设计信息,这一点对于复杂系统设计的顺利进行十分重要。设计过程始终围绕着解决方案的生成开展这一观点和设计过程中创新思维的生成主要由“反绎推理”^[5-7]驱动这一观念颇有异曲同工之妙。其中“反绎推理”的定义由 Schurz^[8]给出,它的目标是提供一个最合适的猜想或构思来解释当前已有的数据。反绎推理和创新设计之间的关联是显而易见的,因为后者的目标正是生成一个有效的解决方案(即猜想或构思),所以能最大程度地契合已有给定的设计需求和约束(即已有数据)。

Darke^[3]的“初级生成器”概念和 Schön^[9]的“设计问题构造”概念联系也颇为紧密。据其论述,一个专业设计师如果对设计问题的主要特性具有准确的认知,那么他就可以据此判断出下一步需要在哪些方面对设计问题的解决方案进行探索和构造。这种问题

构造的过程很少能够在设计工作的开始阶段就通过一些简单的爆发式认知活动被引发出来,它通常发生在设计活动行进的过程当中,这一点也被随后的一些研究所证实^[10-12],在研究中发现了五种不同的设计问题构造框架,这些框架通常以一种循序渐进的方式为一个成功的工业设计团队在解决一个复杂工程项目时所使用。

如 McDonnell^[13]所言,将设计问题构造概念化的一个关键好处,是使设计师能够更好地强化复杂、不确定、不稳定的设计状态中蕴含的秩序和连贯性,最终推动正确设计决策的制定。有效的问题构造会加强设计应遵守的基本原则,即鼓励和支持明确、有把握的设计行动,同时排除那些徒劳、无效的设计行动。复杂系统设计工作的成功与否依赖于设计师是否能够有效地执行一个优质的设计问题构造框架,而这个框架将提供足够的空间用于创新性思维的探索,同时也能提供足够的约束用于聚焦解决方案的生成。此外, Lloyd 和 Oak^[14]的研究也指出表达清晰、系统相关性强的复杂系统设计问题构造框架能够让一个设计团队更好地构造和锚定合作过程中各自的行动策略,从而更好地实现富有成效的设计研发。

1.3 设计问题和解决方案的联合演化

对解决方案的猜想和构思在促进设计师审视和理解设计问题方面所扮演的重要角色,进一步强调了复杂系统设计问题本身是复杂、动态、易变的,能够伴随解决方案猜想和构思的出现、变化和更新不断地发生改变,并反馈到设计师眼前。设计问题界定和解决方案生成之间的这种紧密联系催生了一种复杂系统设计认知理论,即复杂系统的设计应该被视为一个设计问题和解决方案联合演化的过程,而在这个过程中设计师需要探索两个概念空间,即设计问题空间和解决方案空间,而两者之间相互依存、不可分割^[15]。这种联合演化的设计学观点最早由 Maher 等人^[16-18]所提倡,他们利用生物学上两个物种之间由于相互作用关系非常紧密所导致的其在进化过程中相互适应、相互依存这一现象来解释这种联合演化的机制。这一来自自然界的类比进一步催生了复杂系统设计认知过程在计算机方法学上的一种创新性研究思路,即设计问题和解决方案能够分别由计算机建模为两个互相之间存在迭代交互作用的演化过程^[19]。

设计问题和解决方案联合演化的概念在 Dorst 和 Cross^[15]的研究中得到了进一步的发展,他们分析了九名经验丰富的工业设计师独自开展同一复杂系统设计工作的过程。这项调研显示了设计师通过在设计问题空间和解决方案空间之间反复迭代的分析、综合和评价过程,完善了他们对设计问题的界定和解决方案的构思。此外,他们还发现创新性思维并不是在一个所谓的“创新性思维跳跃”中产生,以一种“一瞬间实现”的方式实现从设计问题到解决方案的跨越。

相反,创新性思维的产生是一个在设计问题空间到解决方案空间之间循序渐进的沟通过程^[20]。这个沟通过程在设计师发现和识别出设计任务相关文件中蕴藏的关键性信息时被触发。关于这个问题, Dorst 和 Cross 借用 Schön 的设计问题构造概念提出了设计创新的关键时刻发生在设计问题和解决方案成对地被构造出来的时候。他们还主张那些关于专业设计师的研究^[21]实际上也证实了设计问题和解决方案成对构造的能力对于设计师在复杂系统创新设计方面的高水平表现具有十分重要的作用。

Maher 和 Tang^[22]也在研究中展示了关于设计问题和解决方案联合演化的经验主义证据,其中一项研究发现高年级设计学院学生在进行创新性复杂系统的设计时往往会边思考边自言自语,而另一项研究则发现经验丰富的建筑师在设计复杂建筑物的过程中也常常会回顾性地描述他们的思考过程。这些研究表明设计问题和解决方案的联合演化过程通常表现为设计问题和解决方案之间暂时性的来回往复振荡,这种振荡一般在设计师得到满意的解决方案时结束。虽然这些关于设计问题和解决方案联合演化的设计认知学研究向学界展示了不少经验主义证据,但是 Wiltschnig 等人^[23]还是在研究中表明 Maher 和 Tang^[22],以及 Dorst 和 Cross^[15]的研究中还缺乏更大尺度范围上的设计生态学验证,这是因为他们的研究都是在实验室内对个体设计师在有限时间内的设计活动进行的观察。出于对这一问题的考虑, Wiltschnig 等人进行了一项针对团队设计的研究,这项研究以一个大型复杂工业系统的设计任务为背景,时间跨度长达两年,涉及十九名专业工程设计师。这些设计师根据复杂系统设计任务中的子课题被分成若干小组开展设计工作。研究结果表明设计问题和解决方案联合演化在现实世界中的多人合作设计中普遍存在,有 12% 的设计活动是围绕着联合演化的时间进程和阶段开展的。此外, Wiltschnig 等人还证实了联合演化实际上还会涉及到设计问题空间和解决方案空间之间的多个不同的演进方向这一假设。尽管联合演化大部分为需求分析到解决方案构思之间的映射(占总量的 73%),但是还是有大量从解决方案构思当中迸发出需求分析的情况(占总量的 19%),而这通常会导致设计需求的改变。这些证据表明联合演化在真实的设计过程中存在双向进行的特性,即联合演化具有通过对设计需求的重新解释、改动和增删而改变设计问题空间的能力。

Wiltschnig 等人的研究进一步揭示了设计团队中两个或更多成员之间的交互过程中联合演进的广泛存在。他们的分析显示有 67% 的联合演进过程是通过团队合作的方式开展的,期间设计师相互之间从对方在界定设计问题和搭建解决方案的过程中产生的构思和想法中摄取营养。团队的领导也在这一过程中起到极其重要的催化和促进作用,这一点也在 Ball 和

Ormerod^[24]关于团队管理者通过部署一系列的策略方针来确保设计问题界定和解决方案开发过程的有效开展这一问题的研究中得到印证。这些策略方针是专业设计团队管理者设计认知的高度反映,综合考虑了如何通过刺激和控制正在进行的设计认知和创新过程以确保成功地实现设计问题界定和解决方案的产出。

2 创新设计构思的生成机制

2.1 设计师对早期方案构思的认知依附和对其他候选方案的探索局限

对于复杂系统的创新设计而言,一个令人满意的设计方法论的价值在于其能够确保具备潜力的解决方案猜想或构思能够从一系列候选方案中脱颖而出^[25]。然而,有证据显示设计师们通常趋向于把焦点集中在某个早期形成的解决方案猜想或构思之中,从而不能很好地探索和考察其他可能的候选方案^[26]。这种对其他候选方案探索和考察的局限一般在设计活动的开始阶段就会出现,具体表现为设计师对某些早期出现的解决方案构思具有认知依附性心理。Kant^[27]的一项研究显示复杂算法系统设计师通常习惯于快速搭建一个简单的核心方案构思,而后再将其逐层细化和完善。这种设计师对早期方案构思的认知依附性心理,以及对其他可能的候选方案缺乏探索和考察动力的惰性心理也在其他关于复杂软件系统设计^[28-29]、复杂机械系统设计^[30]、复杂建筑设计^[31]和复杂电气系统设计^[32-33]的研究中被证实。这些研究贯穿打通了不同的复杂系统设计领域,进一步证实了对其他候选方案的探索局限是设计师在开展工作中的一种普遍自然特性。

正如 Cross^[34]所言,一个优秀的设计师要么在设计开始阶段就能够产生足够多的在接下来的设计进程中不需要大幅改动的方案构思;要么能够很好地开展针对早期方案构思的改进工作,以确保即使在接下来的开发过程中不断有各种各样的设计缺陷出现,也能够迅速被加以修正从而使设计方案最终满足复杂系统设计的各种需求和约束。这两种可能性都是切实存在的,尤其是对于那些专业设计师而言,他们往往能够提出优秀的解决方案,同时又具有丰富的经验和技巧提升设计方案和克服各种设计缺陷。Kazakci 等人^[35]的一项研究表明在开展复杂系统设计任务时,专业的设计团队也能在仅有的少量早期方案构思的前提下,通过对其不断改进和提升创造出优秀的设计方案成品。这也从设计团队的尺度上说明,经验丰富的设计师通常并不愿意因为早期方案构思难于改进而轻易将其放弃。Ullman 等人^[36]也在研究中观察到复杂系统设计师在设计过程中更倾向于修补和改进具有缺点的早期设计方案,而不是将其推倒重来,重新构思和探索新的候选方案。正如他们所言“首先出

现的设计构思几乎是神圣的,设计师有时甚至会以一些最令人难以置信的改进方案来促使这个构思得以实现”。相似地,在团队创新的大背景下,个体往往倾向于展示出一种对他们自己的方案构思的一种过度的偏好,而对那些其他人提出的实则可能更具潜力的方案构思视而不见^[37]。

来自 Fricke^[38-39]的研究表明,设计师对于生成和探索其他候选方案的倾向很大程度上受到给定复杂系统设计问题表达方式精确程度的影响。当设计问题被表达得十分精确时,设计师将会倾向于生成更多的候选解决方案。这项研究显示了复杂系统设计认知监控的诱人前景,因为它表明设计师可以非常容易地调控他们生成和构思解决方案的认知和创新活动,从而适应复杂系统设计问题的具体需求。对于一个不精确的问题描述而言,设计师通常会在接下来的设计工作中更积极地为其发展出一个精确的表达和描述,从而促进对于解决方案的探索和其中最优方案的确认。

2.2 解决方案范例带来的认知固化和创新启发

另外一种限制设计师对其他候选解决方案构思和探索的机制是一种被称为“认知固化”的设计学现象,即设计师的想象力将被一些解决方案范例所限制和固化。认知固化的经典阐述记录在 Jansson 和 Smith^[40]的一项研究当中。在这项研究中,高年级设计学院学生需要为给定的复杂系统设计纲要设计解决方案。其中一部分参与者同时也收到了一些该设计纲要的已有解决方案的范例。这部分参与者的设计方案相较于另外那些没有被给与范例的参与者而言,出现了更多范例中的设计要素,即使这些设计要素实际上会妨碍设计方案质量的提升。从这一关于复杂系统设计认知固化的研究工作开始,越来越多的研究者开始采用类似的实验范式复制认知固化的效果,探索影响认知固化出现的因素,例如给定解决方案范例的特性,以及设计师的专业程度^[41-42]。

另一条和认知固化相关的研究路径则关注于给定的解决方案范例是否能够以一种“类比推理”的方式启发设计师产生创新思维^[43-45]。在这些研究中所使用的解决方案范例大多颇具潜力,这点和上述认知固化研究中所使用的那些并不符合复杂系统设计需求的解决方案范例正好相反。此外,类比推理的研究也典型性地采用一些距离复杂系统设计目标领域较远的类比范例,例如类比范例来自生物学领域,而目标领域为工程领域^[46]。在这些类比推理的研究中还进一步对多种不同的程序性因素进行了操控,例如类比范例的数量及其展示的时机。

认知固化和类比推理的研究中这些不同的发现反映了解决方案范例对设计师同时具有认知固化和创新启发这两种不同的作用^[47]。然而, Sio 等人^[48]进行了一项针对四十三项认知固化和类比推理研究工作的系统性分析,发现提供解决方案范例将会触发

更多和范例相关的设计构思,同时减少设计构思的种类发散数量,但同时也会产生一些更具创新性的设计构思。生成的设计构思的质量和范例的借鉴程度之间也存在着一定的正相关关系。此外,范例对解决方案创新性和品质提升的促进作用也会随着展示范例数量的降低和独特性的提升而增加。有趣的是,解决方案构思的数量和质量之间并无明显的相关性,这点将会对“生成更多构思将会增加最终得到优质解决方案的机会”这一论点提出挑战。Sio 等人在研究中还发现解决方案范例的展示时机对复杂系统的设计质量具有重大影响,即如果在设计开始阶段展示范例将会比在设计进行中展示范例对最终解决方案的质量产生更大的正面效应。

针对解决方案范例的认知固化和创新启发效应的研究中,Crilly^[41-42]表示过多地关注实验室环境中的设计学研究将会忽视现实世界中的复杂系统设计实践。这是一个非常值得注意的问题,因为实验室环境中的设计和现实世界中的设计之间的差异无疑是巨大的^[49-50]。因此 Crilly 和 Firth^[51]在研究中呼吁在现实世界的环境中进行更多关于复杂系统设计认知固化和类比推理的研究。

2.3 自发性类比推理和创新性构思的生成

和那些考察类比推理中解决方案范例对复杂系统设计创新性影响的研究形成鲜明对比,另一些研究文献则更加专注于设计过程中那些自发性的类比推理,其中的类比范例是由设计师自己产生的。Visser^[52]和 Ball 等人^[53]针对现实世界环境中的设计研究证实了设计师自己生成的类比范例在复杂系统创新设计中扮演重要角色。Christensen 和 Schunn^[54]针对一家复杂系统设计公司中设计团队的讨论行为进行了调研,发现自发性类比推理是一种被频繁使用的设计策略,其产生的类比范例有三个主要功能:设计问题的识别和认定、设计问题的解决和设计问题的解释。在这项研究中,这些类比范例可以按照和目标设计领域之间的距离分为两类,即广泛分布于设计问题识别过程的领域内类比范例,以及广泛分布于设计问题解释过程的跨领域类比范例。而解决方案的生成则同时涉及领域内和跨领域这两类的类比范例。

在接下来的关于复杂系统设计的研究中,Ball 和 Christensen^[55]发现大多数设计师自发生成的类比范例属于跨领域类型,这说明在高度创新性的复杂系统设计项目中,类比范例对于创新性构思的生成具有巨大价值。这种跨领域的复杂系统设计创新机制可以通过多学科知识的交互启发和相互融合驱动设计师产生创新性构思^[56-58]。Ball 和 Christensen 还发现这些自发生成的类比范例均衡地分布于解决方案生成、设计问题解释和创新性功能搜索当中,而在设计问题的理解部分分布较少。然而最令人吃惊的发现在于,自发性类比推理过程和设计师主观认知不确定性之间具

有紧密的关联,而这些主观认知不确定性通常体现为设计师的一些诸如“或许”、“可能”、“不确定”之类的不确定性描述词汇。研究中关于自发性类比推理不同阶段中不确定性的表述分析,表明类比行为可以逐步降低设计师的主观认知不确定性。Ball 和 Christensen 将此总结为自发性类比推理是一种基于设计认知控制的设计策略,由生成设计解决方案的过程中设计师感受到的认知不确定性触发。一旦开始,自发性类比推理行为将会连续地推动设计活动的运行,同时不断降低设计师的主观认知不确定性。Chan 等人^[59]证实了 Ball 和 Christensen 关于主观认知不确定性和自发性类比推理行为之间存在着紧密的暂时性偶联关系的观察结论。他们采用了一种时滞性逻辑回归方法揭示了主观认知不确定性的增加先于自发性类比推理行为,而在自发性类比推理行为中始终保持一种被提升的状态,在自发性类比推理结束后则下降回到基线水平。

在其他的研究中,Casakin 等人^[60]发现自发性类比推理行为在团队设计中不仅能够确保设计方案的生成顺利,还能够进一步起到增强团队凝聚力、促进合作开展的社会学功能。Christensen 和 Ball^[61]也在研究中发现,在构成复杂化、异质化的设计团队中,设计师具有的各自不同学科领域内的专有知识能够促进基于类比推理的设计创新。在这种构成复杂化、异质化的设计团队中,成员设计师都具有各自不同的教育与知识背景和完全不同的学科领域。对研究数据的分析表明,那些更符合团队成员教育知识背景的类比范例会更频繁地被生成和改进,这大概是因为这些类比范例更加容易被获取。Christensen 和 Ball 在研究中指出,设计团队中复杂化、多样化的知识体系对于生成创新性构思大有益处,因为这些创新性构思可以在类比范例的产生过程中被诱导出来。正如 Menold 和 Jablowski^[62]所言,设计团队中认知模式的多样性可以对设计质量产生积极影响。自发生成的类比范例和设计问题—解决方案联合演化过程之间具有重要联系。Wiltschig 等人^[23]在研究中证实联合演化往往更容易伴随创新性类比范例的出现而同时发生。自发性类比推理行为在联合演化阶段内时常占据主导地位,证明其在创新性构思生成的过程中扮演着重要角色。

3 认知归约策略和机会主义创新策略

3.1 设计问题认知归约策略

复杂系统的设计问题体量庞大、复杂性高,迫使分而治之的设计问题认知归约成为设计师的必然选择。设计师需要将一个复杂系统设计问题分解成若干个相对独立但又相互关联的子问题,以此保证能够进一步开发出有效的集成解决方案^[63-65]。关于这一问题的先驱性研究在 1980 年代就已经出现了,即将复杂系统的设计视为一个系统性、自上而下、分层级的问

题归约和解决方案开发过程。例如 Jeffries 等人^[66]在其复杂软件系统设计方面的研究中发现无论是经验老道的设计师还是新手设计师,在执行复杂系统设计任务时都会不约而同地采用一种自上而下式的设计问题认知归约手段,因而从抽象到具体逐层推进的模块化开发便成为复杂程序系统设计师的一种常用策略。然而 Jeffries 等人也指出经验丰富的设计师更倾向于宽度优先的认知归约策略,而新手设计师则更倾向于深度优先的认知归约策略。

深度优先的认知归约策略有两个核心特征^[67-68]:第一,总体设计问题会被归约为若干个子问题,分别关联到特定的设计目标;第二,这些子问题将进一步在新的一层上再次被归约为若干子问题,如此往复进行下去,直到所有末端子问题都被最终确认为止。这种设计问题的认知归约方法被 Adelson 和 Soloway^[69]称为一种“平衡的方法”,因为总体设计问题对应的总体解决方案是以一种按照抽象程度逐层递进集成而来的。相较于这种方法,深度优先的策略则一次只将一个上层问题归约为一个下层问题(即任意一个抽象层级中都只会存在一个问题,并且它最多只有一个子问题),如此不断地按照抽象到具体的方向进行下去,直到最后一层的子问题得到确认为止^[67]。这种策略相较于宽度优先策略而言更为低效,因为当它在当前抽象层级的解决方案无法和前面层级的解决方案互相兼容时,需要付出昂贵的代价进行回溯纠偏操作。不过深度优先策略对于复杂问题树分支的简化具有很好的帮助作用。Jeffries 等人^[66]在研究中就观察到一些复杂系统设计师会时不时地从宽度优先策略切换到深度优先策略,尤其当某些问题或子问题过于复杂、自己不太熟悉或是十分重要的时候。因此,当这些设计师在进行从上到下的设计问题认知归约时,不自觉地混合使用了宽度优先和深度优先策略,这是一种因地制宜、弹性化的有效手段。

在复杂系统设计认知和创新过程的适应性研究上,Ball 等人^[70]指出虽然专业设计师更偏好自上而下的宽度优先设计问题认知归约策略,但是他们也会典型性地触发深度优先设计问题认知归约策略,从而从战术上规避自身知识不足的窘境。因此,深度优先设计问题认知归约策略是一种对复杂系统设计问题自身复杂性和设计过程中产生的不确定性的应激反应,能够帮助设计师通过对解决方案构思的具体化探索,在纷乱多变的概念体系中重新找回自信。这一观点可以被 Ball 等人^[71]关于复杂软件系统设计团队的研究所支持。该研究发现设计师们会以宽度优先的方式首先针对给定的设计纲要通过一个初步的解决方案,而这一解决方案通常只能满足若干个容易应对的设计需求。在此基础之上,设计师们再进一步聚焦于往上添加难于应对的设计需求,而这通常是以一种深度优先的方式进行的。

3.2 机会主义创新策略

在 20 世纪 90 年代早期,一股新的研究风潮开始出现,同之前认为复杂系统的设计主要是一个结构化、自上而下的思维认知归约活动这一观点形成鲜明对比。这些研究指出无论是专业设计师还是新手设计师,他们的设计认知活动都是高度非结构化的。例如 Guindon^[29]在其软件工程方面的研究中发现 53%的设计活动并非自上而下式的宽度优先设计。Visser^[72]在其关于专业设计师的研究中发现设计师们虽然表示自己倾向于追求一种自上而下式的宽度优先策略,但是他们的实际行动却背离了这种结构化的方法。据此,有的研究将这种解决方案的开发过程描述为一种机会主义的创新设计过程,以此来强调设计师通过偶然获得的机会完成设计方案的现象。然而,并非所有 90 年代的研究都支持这一观点。Ball 和 Ormerod^[67], Ball 等人^[73],以及 Davies^[74]在研究中就表示最好将复杂系统的创新设计视为一个以自上而下和结构性的认知归约过程为主导,期间穿插着一些机会主义性质的创新过程用于规避设计障碍和认知缺陷,同时充分利用新出现的创新机会。目前就此问题的共识是设计是一个结构化认知归约过程和机会主义化创新过程的自适应动态组合^[75-76]。这种自适应与动态的设计认知和创新活动的组织观点指出,持续性的认知监控可以触发设计活动偏离原有的结构化轨道,例如当设计师审视设计过程中的不确定性的时候。

4 未来展望

在关于给定解决方案示例和自发性类比示例在复杂系统的创新设计中引发的认知固化和创新启发作用的研究中,有大量的证据导出了正面的观点,即解决方案的类比示例对于创新性设计构思的产生有积极作用。尤其当这些示例具有一定独特性或是距离目标设计领域较远的时候,这些独特的跨学科解决方案示例作为一种特殊的多学科设计知识可以很好地鼓励设计师更深入地探索解决方案的创新空间。因此,未来在设计方法论方向上可以进一步以多学科设计示例为对象开展跨学科知识融合激励的复杂系统创新设计研究,以一致性和连贯性更高的研究方法,以及更具系统化的视角来进行现实世界中复杂系统设计过程的案例研究,从而更好、更有针对性地探究设计师个体或设计师团队在设计创新实践的认知过程中的自然本质。

在许多设计认知学研究中都观察到,设计师主观认知不确定性可以作为设计认知控制过程的触发器,通过一些诸如类比推理和深度优先的策略,将正在进行的设计认知进程切换到另一个新的方向上。可见设计认知的监控是一个颇具研究价值的信息处理过程,如果从认知监控的视角来考察复杂系统的设计认知

和创新,则可以从一个更全面的角度来综合地理解设计过程中应对波动的主观认知不确定性的策略变化过程。也就是说,理解设计认知动态层面上的变化基础和机理是一个开始,还有更多核心的问题有待探究。例如设计中的主观认知不确定性的衡量仍然没有很好的解决方法。那些对设计师自言自语和交流话语中不确定性词汇的分析和研究,还需要进一步考虑如何准确识别和提出礼貌性标记语的干扰。因此,在接下来的研究中需要一个更有效的方案用于对设计活动中的情感认知因素进行连续性的定量衡量。

根据目前的研究还很难判断究竟是主观认知不确定性还是主观认知确定性在驱动设计创新构思的生成。建立一个可预测的模型用于探究这一问题是目前还远未实现的目标。目前已经可以确定这种模型需要能够适应性地将不确定性作为一种相对性的状态来识别和描述,但现在的方法却只能够用一些模糊的定性描述性术语来衡量不确定性。相信通过未来的不懈努力,这一问题将被很快克服,这对于构建复杂系统设计认知和创新的全方位研究体系具有重要作用。

5 结语

本文对复杂系统设计认知和创新方面的设计学研究工作进行了梳理和分析,从多个角度出发,考察了影响设计认知和设计创新的多样化元素,包括设计师认知背景体系的不同、设计经验积累的不同、设计专业领域的不同、设计问题复杂度的不同、设计师采用设计策略和方法论的不同、个体设计师主导和设计师团体主导的不同,以及其他一些诸如是否加入解决方案示例和客户参与度方面的因素等等。将这些研究按照由浅入深的设计认知递进关系梳理为设计问题界定和解决方案构思中的设计认知过程、创新设计构思的生成机制、认知归约策略和机会主义创新策略这三个方向,并对其进行了分析和展望。在未来的设计学研究中,可以进一步以多学科设计示例为对象,开展跨学科知识融合激励的复杂系统创新设计研究,以更具系统化的视角研究现实世界中复杂系统设计过程的案例,与此同时,加强关于设计师主观认知不确定性的定量建模研究,从而更好、更有针对性地探究设计师个体或设计师团队在设计创新实践中认知过程的自然本质。

参考文献:

- [1] CHRISTIAANS H, DORST K H. Cognitive Models in Industrial Design Engineering: a Protocol Study[J]. Design Theory and Methodology, 1992, 42(1): 131-140.
- [2] ATMAN C J, CHIMKA J R, BURSIC K M, et al. A Comparison of Freshman and Senior Engineering Design Processes[J]. Design Studies, 1999, 20(2): 131-152.
- [3] DARKE J. The Primary Generator and the Design Process[J]. Design Studies, 1979, 1(1): 36-44.
- [4] LLOYD P, SCOTT P. Difference in Similarity: Interpreting the Architectural Design Process[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1995, 22(4): 383-406.
- [5] CRAMER-PETERSEN C L, CHRISTENSEN B T, AHMED-KRISTENSEN S. Empirically Analysing Design Reasoning Patterns: Abductive-deductive Reasoning Patterns Dominate Design Idea Generation[J]. Design Studies, 2019, 60: 39-70.
- [6] DONG A, LOVALLO D, MOUNARATH R. The Effect of Abductive Reasoning on Concept Selection Decisions[J]. Design Studies, 2015, 37: 37-58.
- [7] 李彦, 刘红围, 李梦蝶, 等. 设计思维研究综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(15): 1-20.
LI Yan, LIU Hong-wei, LI Meng-die, et al. A Review of Design Thinking Research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(15): 1-20.
- [8] SCHURZ G. Patterns of Abduction[J]. Synthese, 2008, 164(2): 201-234.
- [9] SCHÖN D. The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action[M]. London: Temple Smith, 1983.
- [10] ADAMS R, ALEONG R, GOLDSTEIN M, et al. Rendering a Multi-dimensional Problem Space as an Unfolding Collaborative Inquiry Process[J]. Design Studies, 2018, 57: 37-74.
- [11] GOEL V, PIROLLO P. The Structure of Design Problem Spaces[J]. Cognitive Science, 1992, 16(3): 395-429.
- [12] VALKENBURG R, DORST K. The Reflective Practice of Design Teams[J]. Design Studies, 1998, 19(3): 249-271.
- [13] MCDONNELL J. Design Roulette: a Close Examination of Collaborative Decision-making in Design from the Perspective of Framing[J]. Design Studies, 2018, 57: 75-92.
- [14] LLOYD P, OAK A. Cracking Open Co-creation: Categories, Stories, and Value Tension in a Collaborative Design Process[J]. Design Studies, 2018, 57: 93-111.
- [15] DORST K, CROSS N. Creativity in the Design Process: Co-evolution of Problem-solution[J]. Design Studies, 2001, 22(5): 425-437.
- [16] MAHER M L. A Model of Co-evolutionary Design[J]. Engineering with Computers, 2000, 16(3-4): 195-208.
- [17] MAHER M L, POON J. Modeling Design Exploration as Co-evolution[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 1996, 11(3): 195-209.
- [18] POON J, MAHER M L. Co-evolution and Emergence in Design[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1997, 11(3): 319-327.
- [19] DORST K. Co-evolution and Emergence in Design[J]. Design Studies, 2019, 65: 60-77.
- [20] CROSS N. Descriptive Models of Creative Design: Application to an Example[J]. Design Studies, 1997, 18(4): 319-327.

- 427-440.
- [21] CROSS N, CROSS A C. Expertise in Engineering Design[J]. *Research in Engineering Design*, 1998, 10(3): 141-149.
- [22] MAHER M, TANG H H. Co-evolution as a Computational and Cognitive Model of Design[J]. *Research in Engineering Design*, 2003, 14(1): 47-64.
- [23] WILTSCHNIG S, CHRISTENSEN B T, BALL L J. Collaborative Problem-solution Co-evolution in Creative Design[J]. *Design Studies*, 2013, 34(5): 515-542.
- [24] BALL L J, ORMEROD T C. Applying Ethnography in the Analysis and Support of Expertise in Engineering Design[J]. *Design Studies*, 2000, 21(4): 403-421.
- [25] SIMON H A. *The Sciences of the Artificial*[M]. Cambridge: MIT Press, 1969.
- [26] BALL L J, LAMBELL N J, REED S E, et al. The Exploration of Solution Options in Design: a “Naturalistic Decision Making” Perspective[M]. The Netherlands: Delft University Press, 2001.
- [27] KANT E. Understanding and Automating Algorithm Design[J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1985(11): 1361-1374.
- [28] ADELSON B, SOLOWAY E. A Model of Software Design[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 1986, 1(3): 195-213.
- [29] GUINDON R. Knowledge Exploited by Experts during Software System Design[J]. *International Journal of Man-machine Studies*, 1990, 33(3): 279-304.
- [30] ULLMAN D G, DIETTERICH T G, STAUFFER L A. A Model of the Mechanical Design Process Based on Empirical Data[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis & Manufacturing*, 1988, 2(1): 33-52.
- [31] ROWE P. *Design Thinking*[M]. Cambridge: MIT Press, 1987.
- [32] BALL L J, EVANS J S B T, DENNIS I. Cognitive Processes in Engineering Design: a Longitudinal Study[J]. *Ergonomics*, 1994, 37(11): 1753-1786.
- [33] BALL L J, MASKILL L, ORMEROD T C. Satisficing in Engineering Design: Causes, Consequences and Implications for Design Support[J]. *Automation in Construction*, 1998, 7(2-3): 213-227.
- [34] CROSS N. *Design Cognition: Results from Protocol and Other Empirical Studies of Design Activity*[M]. Oxford: Elsevier Science, 2001.
- [35] KAZAKCI A O, GILLIER T, PIAT G, et al. Brainstorming Versus Creative Design Reasoning: a Theory-driven Experimental Investigation of Novelty, Feasibility and Value of Ideas[C]. New York: Springer, 2014.
- [36] ULLMAN D G, DIETTERICH T G, STAUFFER L A. A Model of the Mechanical Design Process Based on Empirical Data[J]. *AI EDAM*, 1988, 2(1): 33-52.
- [37] ONARHEIM B, CHRISTENSEN B T. Distributed Idea Screening in Stage-gate Development Processes[J]. *Journal of Engineering Design*, 2012, 23(9): 660-673.
- [38] FRICKE G. Successful Individual Approaches in Engineering Design[J]. *Research in Engineering Design*, 1996, 8(3): 151-165.
- [39] FRICKE G. Successful Approaches in Dealing with Differently Precise Design Problems[J]. *Design Studies*, 1999, 20(5): 417-429.
- [40] JANSSON D G, SMITH S M. Design Fixation[J]. *Design Studies*, 1991, 12(1): 3-11.
- [41] CRILLY N. Creativity and Fixation in the Real World: a Literature Review of Case Study Research[J]. *Design Studies*, 2019, 64: 154-168.
- [42] CRILLY N. Methodological Diversity and Theoretical Integration: Research in Design Fixation as an Example of Fixation in Research Design?[J]. *Design Studies*, 2019, 65: 78-106.
- [43] CASAKIN H, GOLDSCHMIDT G. Expertise and the Use of Visual Analogy: Implications for Design Education[J]. *Design Studies*, 1999, 20(2): 153-175.
- [44] GOEL A K. Design, Analogy, and Creativity[J]. *IEEE Expert*, 1997, 12(3): 62-70.
- [45] HELMS M, VATTAM S S, GOEL A K. Biologically Inspired Design: Process and Products[J]. *Design Studies*, 2009, 30(5): 606-622.
- [46] YARGIN G T, FIRTH R M, CRILLY N. User Requirements for Analogical Design Support Tools: Learning from Practitioners of Bio-inspired Design[J]. *Design Studies*, 2018, 58: 1-35.
- [47] VASCONCELOS L A, CRILLY N. Inspiration and Fixation: Questions, Methods, Findings, and Challenges[J]. *Design Studies*, 2016, 42: 1-32.
- [48] SIO U N, KOTOVSKY K, CAGAN J. Fixation or Inspiration? A Meta-analytic Review of the Role of Examples on Design Processes[J]. *Design Studies*, 2015, 39: 70-99.
- [49] BALL L, CHRISTENSEN B T. Designing in the Wild[J]. *Design Studies*, 2018, 57: 1-8.
- [50] CASH P J, HICKS B J, CULLEY S J. A Comparison of Designer Activity Using Core Design Situations in the Laboratory and Practice[J]. *Design Studies*, 2013, 34(5): 575-611.
- [51] CRILLY N, FIRTH R M. Creativity and Fixation in the Real World: Three Case Studies of Invention, Design and Innovation[J]. *Design Studies*, 2019, 64: 169-212.
- [52] VISSER W. Two Functions of Analogical Reasoning in Design: a Cognitive-psychology Approach[J]. *Design Studies*, 1996, 17(4): 417-434.
- [53] BALL L J, ORMEROD T C, MORLEY N J. Spontaneous Analogising in Engineering Design: a Comparative Analysis of Experts and Novices[J]. *Design Studies*, 2004, 25(5): 495-508.
- [54] CHRISTENSEN B T, SCHUNN C D. The Relationship of Analogical Distance to Analogical Function and Pre-inventive Structure: the Case of Engineering Design[J]. *Memory & Cognition*, 2007, 35(1): 29-38.

- [55] BALL L J, CHRISTENSEN B T. Analogical Reasoning and Mental Simulation in Design: Two Strategies Linked to Uncertainty Resolution[J]. *Design Studies*, 2009, 30(2): 169-186.
- [56] 胡洁, 戚进. 创新设计方法之融合创新[J]. *机械设计*, 2019, 36(11): 1-5.
HU Jie, QI Jin. Integrated Innovation of Innovative Design Methods[J]. *Mechanical Design*, 2019, 36(11): 1-5.
- [57] 胡洁, 陈斌. 创新设计中的源泉, 机制和评价问题研究综述[J]. *包装工程*, 2020, 41(18): 60-70.
HU Jie, CHEN Bin. A Review of Research on the Source, Mechanism and Evaluation of Innovative Design[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(18): 60-70.
- [58] 朱思羽, 胡洁, 戚进. 基于美学、人体工学及性能的多因素融合设计[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(21): 199-207.
ZHU Si-yu, HU Jie, QI Jin. Multi-factor Fusion Design Based on Aesthetics, Ergonomics and Performance[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(21): 199-207.
- [59] CHAN J, PALETZ S B F, SCHUNN C D. Analogy as a Strategy for Supporting Complex Problem Solving under Uncertainty[J]. *Memory & Cognition*, 2012, 40(8): 1352-1365.
- [60] CASAKIN H, BALL L J, CHRISTENSEN B T, et al. How do Analogizing and Mental Simulation Influence Team Dynamics in Innovative Product Design?[J]. *AI EDAM*, 2015, 29(2): 173-183.
- [61] CHRISTENSEN B T, BALL L J. Creative Analogy Use in a Heterogeneous Design Team: the Pervasive Role of Background Domain Knowledge[J]. *Design Studies*, 2016, 46: 38-58.
- [62] MENOLD J, JABLOKOW K. Exploring the Effects of Cognitive Style Diversity and Self-efficacy Beliefs on Final Design Attributes in Student Design Teams[J]. *Design Studies*, 2019, 60: 71-102.
- [63] GOEL V, PIROLLO P. Motivating the Notion of Generic Design Within Information-processing Theory: the Design Problem Space[J]. *AI Magazine*, 1989, 10(1): 18-36.
- [64] GOEL V, PIROLLO P. The Structure of Design Problem Spaces[J]. *Cognitive Science*, 1992, 16(3): 395-429.
- [65] 刘小莹, 李彦, 麻广林, 等. 面向产品创新的概念设计认知过程及支持系统[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(1): 190-196.
LIU Xiao-ying, LI Yan, MA Guang-lin, et al. Cognitive Process and Support System of Conceptual Design for Product Innovation[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(1): 190-196.
- [66] JEFFERIES R, TURNER A A, POLSON P G, et al. *The Processes Involved in Designing Software*[M]. Hillsdale: Erlbaum, 1981.
- [67] BALL L J, ORMEROD T C. Structured and Opportunistic Processing in Design: a Critical Discussion[J]. *International Journal of Human-computer Studies*, 1995, 43(1): 131-151.
- [68] 尹碧菊, 李彦, 熊艳, 等. 基于概念设计思维模型的计算机辅助创新设计流程[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(2): 263-273.
YIN Bi-ju, LI Yan, XIONG Yan, et al. Computer Aided Innovative Design Process Based on Conceptual Design Thinking Model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(2): 263-273.
- [69] ADELSON B, SOLOWAY E. A Model of Software Design[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 1986, 1(3): 195-213.
- [70] BALL L J, JONATHAN S B T E, DENNIS I, et al. Problem-solving Strategies and Expertise in Engineering Design[J]. *Thinking & Reasoning*, 1997, 3: 247-270.
- [71] BALL L J, ONARHEIM B, CHRISTENSEN B T. Design Requirements, Epistemic Uncertainty and Solution Development Strategies in Software Design[J]. *Design Studies*, 2010, 31: 567-589.
- [72] VISSER W. More or Less Following a Plan During Design: Opportunistic Deviations in Specification[J]. *International Journal of Man-machine Studies*, 1990, 33(3): 247-278.
- [73] BALL L J, EVANS J S B T, DENNIS I. Cognitive Processes in Engineering Design: a Longitudinal Study[J]. *Ergonomics*, 1994, 37(11): 1753-1786.
- [74] DAVIES S P. Characterizing the Program Design Activity: Neither Strictly Top-down Nor Globally Opportunistic[J]. *Behavior & Information Technology*, 1991, 10(3): 173-190.
- [75] VISSER W. Organization of Design Activities: Opportunistic, with Hierarchical Episodes[J]. *Interacting with Computers*, 1994, 6(3): 239-274.
- [76] 麻广林, 李彦, 熊艳, 等. 基于认知试验的创新设计研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(4): 625-632.
MA Guang-lin, LI Yan, XIONG Yan, et al. Innovative Design Based on Cognitive Experiment[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(4): 625-632.