

文章编号:1006-2467(2019)07-0873-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.07.015

论设计科学

谢友柏

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 基于代表性学术观点的变化对设计,特别是以设计科学为命题的研究的发展历程进行了分析.该历程表现为从关注设计方法到研究知识在设计中的行为,从研究物质产品的设计到认为物质产品、精神产品和社会产品都应该遵循同样的公理进行设计.进一步的研究表明:设计本质上是一个知识流动、集成、竞争和进化的过程,而知识在社会上流动所产生的对设计竞争力的影响大于其在设计师(或团队)头脑中流动所产生的影响,特别是对于创新的影响;完成一个成功的设计,不仅仅需要设计的过程知识,而且需要设计的构成知识,因而提出了知识供给和知识高效运用的诸多问题;设计不仅仅是技术问题,更是具有极其重要社会影响的问题,设计有必须共同遵守的原则.在此基础上,针对一个需求-功能-结构-行为(RFSB)设计模型展开研究,其中:功能知识集成算法已经取得较大的进展;而结构知识集成则由于结构知识十分复杂而尚未获得合适的知识表达方案,需要人工参与.

关键词: 设计;知识;创新;设计科学;需求-功能-结构-行为(RFSB)模型

中图分类号: TH 122

文献标志码: A

Design Science

XIE Youbai

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on analyzing the variation of representative academic viewpoints, the developing trends of design studies, especially on the theme of design science are given. The trends present as changing from paying attention to the methodology of design to investigating the knowledge behavior in design, and from studying the design of material products to considering that either the design of material products, mental products or social products should follow similar design axioms. Our further studies show that the design is essentially a process of knowledge flow, knowledge integration, knowledge competitiveness and knowledge evolution, the influence on the design competitive power of the knowledge flow in society is greater than that in the brains of designers (or teams) especially in innovation and creation. Successful designs need not only process knowledge but also constitution knowledge and then arise the problems of providing knowledge and utilizing knowledge efficiently in design. Design is not only a technical issue but also a very influential social issue, and therefore there are common tenets which must be followed in all designs. On these bases, a requirement-function-structure-behavior (RFSB) framework of design is in progress. Good results have been obtained in the algorithm of integrating function knowledge, and there are still difficulties in integrating structure knowledge. Main problems come from no appropriate scheme

收稿日期:2018-11-27

基金项目:国家自然科学基金(59990470,50935004,51575342)资助项目

作者简介:谢友柏(1933-),男,江苏省高邮市人,教授,中国工程院院士,主要研究领域为设计科学, E-mail:ybxie@mail.sjtu.edu.cn.

because of the complexity of modeling structure knowledge, which requires human participation.

Key words: design; knowledge; innovation; design science; requirement-function-structure-behavior (RFSB) framework

设计是人类一切有目的活动的开始,是为了实施而制定实施结果的面貌和实施路径,以求达到活动目的.在手工业时代,设计和实施往往集中在同一人身上,竞争靠的是工匠的技艺.到了工业社会,科学技术迅速发展,物质产品(即满足物质需求的产品)的生产规模极度扩张,设计竞争所需要的知识越来越广泛和深入,而实施则由人操作机器进行,因此设计不得不与实施分离而成为一个专门领域,与设计相关的研究也随之发展起来.然而,在精神产品(即满足精神需求的产品)的设计中,在很大程度上设计与实施依然集于一人之身,而对于社会产品(即满足社会需求的产品)的设计则兼而有之^[1].

Gropius 和 Fuller^[2-4]较早地提到了设计科学(Design Science)这个词. Gropius 在主持德国国立建筑学院(Bauhaus)工作期间(1919~1927年)以及后来在美国哈佛大学任教时,力图为设计寻求一个技术和艺术的公分母,实现技术和艺术的统一,并将这个追求表达为设计科学. Fuller 是有名的建筑师和发明家,他的理念是在设计中有效地利用科学原理,使地球上的有限资源能够满足全人类的需求而不破坏这个行星的生态过程.他在世界各地演讲,宣传他的利用世界资源造福人类的主张,并宣告将有“世界设计科学10年(1965~1975年)”的到来.虽然设计科学并没有如愿被人们给予应有的重视,这些愿望时至今日仍旧可以作为关于设计科学研究的指向标.然而,此后仅仅是物质产品的设计方法论研究成为人们关注的重点,这与自然科学进展以及物质产品生产规模竞争和二次世界大战需求的推动不无关联^[1,5].典型代表作可以举 Pahl 和 Beitz 的系统设计方法(Systematic Approach, 1977年)^[6-7]和 Suh 的公理设计(Axiomatic Design, 1990年)^[8-9]. Suh 的一个重要贡献是认为设计不仅仅是产品设计,还有制造过程和系统(即工厂和制造单元)的设计,模拟或数字电路、通信系统和计算机硬件、软件系统的设计,企业组织机构的设计,室内家具布置和装饰的设计,城市政府机构以及战略规划的设计等,都要遵守设计的两个公理:功能独立公理和最小信息公理^[9].这就意味着存在所有设计,包括物质产品、精神产品和社会产品的设计都要遵守的基本、共同规律,这就给予人们一个对设计的更为全面的理

解.然而这些研究都没有具体分析知识在设计中的行为,前者认为设计需要的知识在培养中就必须注入工程师的头脑,后者的研究则没有涉及如何取得和运用知识来满足设计的两个公理.此后的研究逐渐深入到设计与知识的关系^[10].如 Gero 等的功能-行为-结构(FBS)模型(1990年)^[11-12],研究了认知在设计师头脑或者设计智能体(Agents)中的形成,采用外部世界(External World)、期望世界(Expected World)和演绎世界(Interpreted World)以及情景(Situatedness)等概念描述各种信息在人的头脑中形成设计知识的过程. Hatchuel 等的概念-知识理论(C-K Theory, 2003年)^[13-15],研究的是概念和知识在设计过程中的区分和相互转换过程,由于力图以命题逻辑推理来说明这个转换过程,把本来很容易弄明白的事变得晦涩难懂. Gero 和 Hatchuel 研究的过程,概括起来就是设计中经常采用的迭代回归(Suh 称其为 zig-zag)过程的更精细分析,进入到研究知识在设计中行为的深度.从这个发展历程可以看到,随着社会进步的需要,设计研究一步一步向纵深发展,虽然还不能说已经深入到涉及所有领域设计的基本、共同规律和共同原则的研究,也不能说已经充分实现了 Gropius 和 Fuller 的理想.

这些研究,存在4方面不足:①没有全面探讨设计中的知识流动和运用,或者仅仅涉及知识在设计师(或者团队,下同)头脑里的演变.实际上,知识在社会中的流动对设计竞争力的影响要远远大于在一个人(或者少数人)头脑里的流动.②在设计方法论研究潮流影响下,这些研究更多关注的是设计过程知识,无视设计构成知识的性质和来源,认为设计构成知识在培养阶段已经注入设计师的头脑.近百年的教育实践表明,在知识爆炸时代,没有一种教育体系能够完成这样的任务.③相比设计过程知识,设计师更需要但是更缺乏的是设计构成知识,而这更依赖于社会的知识供给^[16].当设计中的构成知识大量由社会供给而不是受教育后就存储在设计师头脑里,设计知识特别是设计构成知识的流动和集成就产生了许多新的问题,而这些问题是此前所未曾涉及的.④这些研究都把设计看成是一个技术问题,仅仅为了招揽顾客而不深入设计的社会属性和必须遵守的共同原则.不计自娱自乐的设计,如果将

凡是要提供给社会的事、物,统称为产品,产品的产生和分配,是一个社会问题,设计什么和不设计什么对人类命运会产生重大影响是显而易见的.任何设计都不仅要考虑满足物质需求、精神需求,也要考虑满足社会需求,也就是要满足人们追求共同美好生活和社会和谐发展的需求^[17].

设计的研究在各个不同专业领域中向纵深发展,对覆盖所有领域设计的基本、共同规律和必须遵守的共同原则缺乏关注是当今的现状.设计科学的研究就要承担起这样的任务.当一个全新的社会理想要在当今社会环境中脱颖而出时,设计科学研究和基于设计科学的设计就显得尤为重要.

1 设计的知识基础

设计知识是能够回答一个设计问题的答案,这个答案可以多种不同形式存在和表达,例如文字、图像、公式、模型等,可以是隐性知识,也可以是显性知识.回答一个独立存在最小问题的答案称为知识条,知识条往往要从复杂问题答案中经过知识处理提取出来,以便于在解决设计问题时应用.本文所提知识都是指设计知识^[18].

设计本质上是一个知识流动、集成、竞争和进化的过程,设计科学中有 4 个关于设计知识的定律,即:设计以已有知识为基础定律,设计知识竞争性定律,设计以新知识获取为中心定律和设计知识不完整性定律^[19].设计以已有知识为基础定律是指:人不可能以不知道的事、物来设计.即使是做梦,梦里的情景也是由已经知道的事、物随机构成.已有知识浩如瀚海,不可能囫圇吞枣地全搬到一个设计中,而是要针对设计要满足的需求取其相关部分重新组合,这就是所谓的集成.设计知识竞争性定律告诉人们:集成中采用或者不采用哪些知识是竞争,竞争存在于设计的每一个步骤.竞争不仅存在于设计中,而且会延续到实施、使用和报废处理阶段.竞争的结果是人们得到新知识,在设计之前由于还不存在这些知识,结果当然是不知道的,这就是设计以新知识获取为中心定律. Hatchuel 用命题逻辑阐述设计中的已知和未知以及新知识和新目标(Objects),其实这个普遍存在的事实用定律来归纳更能够说明问题.正由于竞争存在于设计及其后续过程的全生命周期,设计时不可能然而要尽可能得到设计所需要的各方面知识,于是就有了设计知识不完整性定律,这个定律是人类追求真理的动力,人们总是希望知道得更多、更完整.要使设计正确,在此后的竞争中取胜,对于每一个决策都要想方设法去获取其在未来

(后续设计、实施、实施后的运行以及生命周期结束后的处理过程)可能发生问题和处置措施的知识,这就是新知识获取.设计以新知识获取为中心定律告诉人们,设计的每一个决策,都不能不计后果.特别是对于后设计知识的获取绝不能掉以轻心,不论是物质产品、精神产品或者社会产品的设计都是如此.

说到底,如图 1 所示,设计是一个按照过程知识将构成知识集成起来的过程,其产物是一个新知识集,按照这个知识集的规定去实施,需要达到活动期望的目的.设计过程知识告诉人们,集成要遵循一定的顺序进行,与 Gero 的 FBS 模型不同,我们的团队正在研究一个需求-功能-结构-行为(RFSB)模型^[20].研究表明,在不知道结构知识(S)的情况下,很难从功能知识(F)得到行为知识(B). Pahl & Beitz 的原理解(Principle Solution)也存在同样问题,从功能需求出发很难找到能够实现需求的科学“原理”.两者都需要有设计师额外的已有知识支持,当额外知识需要由社会提供时问题尤为突出.如果定义行为是结构变化的描述,在不知道结构的情况下,就无所谓行为,从知识的视角看这一点很容易理解^[17].

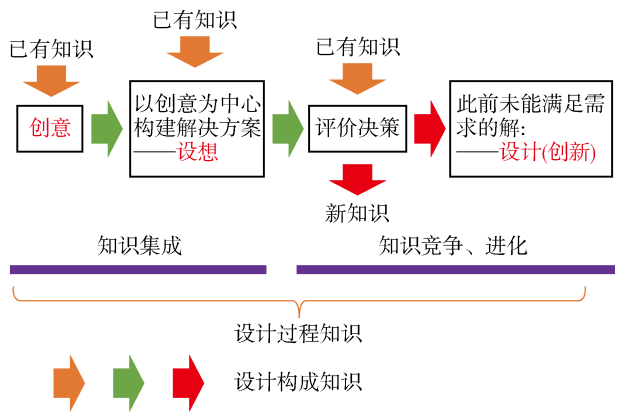


图 1 设计过程是知识集成的过程^[16]
Fig. 1 Design as a process of knowledge integration^[16]

与 Suh 不同的是,RFSB 模型将需求知识(R)明确定义为以自然语言表述的设计需求^[21].自然语言表达的需求往往是模糊的、有歧义甚至是矛盾的,这反映了人的思维本身的不确定性和矛盾. Hatchuel 为此专门定义了一个概念空间(Concept Space).知识集成不能在不确定下进行,特别是自动化的集成,因此设计必须在系统模型上进行,也就是设计构成知识需要由确定的、无歧义的系统建模语言表达,这一点此前的研究从未见有明确讨论. RFSB 模型定义 F 是以系统建模语言表达的功能知识,在设计开始阶段,设计师做的第一件事是从

R 诠释 F . 设计从集成功能知识开始, 是基于任何有目的活动都是为了实现目的也就是功能的认知, 并不排除 R 可能包含功能以外的需求, 例如对于物质产品要减轻重量, 精神产品要降低成本, 社会产品要提高实施效率等等, 然而这只能通过改变 S 而改变 B 来实现, 不能因为要满足这些需求而损失 F . 不同设计师的诠释有他的主观性, R 及 F 是否能够实现, 要经过如图 1 所示的复杂的知识流动、集成、竞争和评价过程, 并不能如 Hatchuel 所说那样用几个命题逻辑的运算符就能解决.

RFSB 模型下一步的工作是要从 F 求 S . 能够匹配 F 的 S 一般是不存在的, 即使有这样的 S , 也要通过设计考察是否有改进的必要. 当找不到匹配 F 的 S , 就要将 F 分解成若干个小的 F_i , 从 $F = \sum F_i$ 中的 F_i 找 S_i . \sum 在这里表示集成而不是简单的求和. 只要分解得充分小, 匹配 F_i 的 S_i 总是比较容易找到. 即使有少数找不到, 也有可能通过构建以创意为核心的解决方案(将在下面讨论) 得到. 这时生成的 $F = \sum F_i$ 是一个功能知识集, 是能够实现 F 的功能架构知识, 其中 F_i 是一个功能知识子集, 当一个 F_i 小到不必再分时, 就称为功能子集或者功能单元.

设计的功能架构知识 $F = \sum F_i$ 说的是 F 可以由这些 F_i 集成得到, 而通过互联网从社会上得到这些 F_i 的研究已经有相当进展, 包括 F_i 以输入、输出和传递函数组成的系统建模语言表达, R 和 F_i 的分类, 在互联网上发布和搜索的原则, 搜索算法和集成的算法等等^[17, 22-24]. 不过目前社会上能够按照要求供给 F_i 的供应商很少, 这些研究还有待实践检验. 一个重要的设想是 F_i 的供应商应该能够同时提供匹配功能子集或者功能单元 F_i 的 S_i 和 B_i . 当有了 S_i 以后, 目前还不能完全依赖算法从 S_i 集成得到 $S = \sum S_i$, 还需要人的介入. 这是由于 S_i 的表达非常复杂, 还没有自动处理诸 S_i 之间相互关系的合适的解决方案. 功能是一个高度抽象的概念, 而结构则十分具体, 很难规范为简单的概念并以各种应用都能够接受的规范方式表达. 对于物质产品、精神产品和社会产品, 它们的结构知识在表达上有很大差异, 也是一个原因. 即使仅仅是物质产品的结构知识, 目前也没有规范的可以满足集成要求的系统结构模型. CAD 软件一般只表达结构的几何知识, 对于非几何知识就没有规范的表达方法, 甚至连几何的测量基准也很难在不同的 CAD 软件供应商之间规范和统一. SysML 是系统工程的建模工具, 但是缺乏

规范表达结构细节的能力.

B_i 的集成, 可以通过由 $S = \sum S_i$ 建立的系统数值模型模拟计算或者在系统实体模型上测试得到. 这在理论上没有问题, 不过对于特别大的系统, 对整个系统建立数值模型计算^[25] 或者制作实体模型^[17] 测试工作量都非常大, 除非特别重要的产品, 往往只做其中某些子系统或者某些方面行为的模拟或者测试. 其他则认为可以从已有知识经过简单推算得到, 例如以传递函数方程计算各个功能单元输入、输出的量值. 某些行为单独模拟或者少数行为联合模拟, 有不少商品软件做得很好, 可以采用.

结构决定行为, 行为实现功能, 设计最终给出的是实施结果的面貌和实施路径, 也就是结构知识和如何实现这个结构的知识. 如同此前所有研究都表明的那样, S 并不能一次得到, $F = \sum F_i$ 和 $S = \sum S_i$ 都可能有多重选择, 采取哪一个方案或者不采取哪一个方案是由评价决定, 是竞争的结果. 评价包括是否满足 R 、是否满足可行的约束条件、是否违反设计必须遵守的共同原则以及预测竞争取胜的可能性. 也许最终所有的方案都不能通过评价, 那么就要回过头来修改 F 、 F 的架构, 也就是从 R 诠释出不同的 F 、采用不同的 $\sum F_i$ 或者改变 R . 这在设计中是经常发生的.

既然知识对于设计和设计竞争如此重要, 那么一个社会的设计知识供给做得好不好和如何能够做得更好就是一个不能不研究的设计的基本、共同规律问题, 包括今天的知识供给和明天的知识供给, 涉及到社会上知识流动的组织 and 国民教育, 特别是对明天的设计师的培养^[26], 也是一个社会从主要依靠精英阶层创新转变到能够万众创新所必须解决的问题^[16].

知识到了设计师手里, 如何能够高效运用, 也是设计和设计竞争要解决的重要命题. 除掉下面将要分析的借助直觉和灵感产生创意的条件外, 还包括如何利用自动化和智能化手段辅助知识集成, 限于篇幅不再进一步讨论.

2 创新与设计的关系

创新是人类的有目的活动, 其目的是在竞争中取胜. 所以创新也包含设计和实施两个部分, 也需要设计, 也必定遵循设计的基本、共同规律和必须遵守设计的共同原则. 深入研究创新的内涵、创新的过程、创新成功的条件, 特别是创新与设计的关系非常重要.

创新有 3 个要素:采用此前未曾用过的知识,满足现在未能满足的需求,在竞争中取胜^[17]. 所谓此前未曾用过的知识,是在满足该需求上未曾用过,不同的使用方法亦认为未曾用过. 否则要么是胜算不大,要么就是模仿. 如果不是满足现在未能满足的需求,创新也就失去竞争的价值. 在采用此前未曾用过的知识,满足现在不能满足的需求时,如果有若干不同方案(可能来自不同的竞争参与方),就存在竞争,只有竞争取胜的方案,才能够达到创新的目的. 这 3 个要素,采用此前未曾用过的知识是关键. 怎么去找此前未曾用过的知识? 怎么使用找到的知识去满足现在未能满足的需求? 找到的知识用起来是否有竞争力? 这些都是设计科学要研究的问题. 知识不会自动变成创新,只有通过设计. 设计是知识(包括高新技术)流向创新的纽带或者桥梁,没有正确的设计,就没有成功的创新. 现在到处都贴创新标签,却很少提到设计,提到设计科学,这实际上是对创新的内涵、创新的过程和创新成功的条件缺乏研究的表现. 例如讲“科技创新”,简称“科创”,作为口号当然可以,如果把它理解为创新之路,就有不妥当的地方. 科学(Science)和设计(Design)是人类两种性质不相同的活动^[2,5,17]. 科学是探索已经客观存在事、物的未知规律,设计是用已有知识主观塑造尚不存在事、物的面貌和实现面貌的路径. 科学研究获取到的新知识,并不都能够立马成为创新,有的也许长时期都不能为当前的创新所采用. 过分强调科学的生产力属性使科学承担了不能承担的压力,助长了功利主义的科学观^[27]. 设计以已有知识为基础定律告诉人们,知识获取与知识积累是科学的不可替代的使命,是创新的竞争力的基础. 没有深厚的知识积淀,创新就是无源之水、无米之炊. 积淀是一个长期的过程,是一个“坐冷板凳”的过程,不能期望一蹴而成、立等可取. 一些地方搞高新区,不问知识从哪里来,以为圈一块地,盖一排楼,弄一批企业进驻,挂上牌子,就能够创新,这是不了解知识积淀对于创新的意义. 有人不赞成在科学研究上提倡弯道超车^[28],这是对的. 探索已有事、物的未知规律,因为是客观存在又不为人知,只能老老实实在地探索,任何投机取巧都可能错失正确认识这客观未知规律的良机. 不过对于设计,正好相反,设计是塑造尚不存在事、物的面貌和实施路径,存在不同方案(知识集)之间的竞争,竞争需要的恰恰是弯道超车,这就是设计和科学的不同之处. 弯道超车要采用此前未曾用过的知识,满足现在不能满足的需求. 不弯道超车,就是模仿一个已经存在的事、物,如果都是这种设计,人类

就不能进步.

有了知识,是不是就能够创新成功? 还需要解决设计知识供给和设计中知识的高效运用问题. 在科学家头脑里积淀的知识不等于设计师能够得到,写在书本上的知识不等于设计师就能够高效运用,只有经过处理以一定形式存在和表达,才有利于设计的集成^[17]. 所以设计知识供给并不是一个简单的问题,需要认真解决. 比如,如果没有网上交易和快递物流的支持,消费不可能有如今这样的发展. 有了充分的知识供给,知识集成就成为是否能够高效运用知识的重要步骤.

设计中,有一个对于设计和创新非常重要且与知识运用相关的难以捉摸的概念,叫做:创意. 在文化艺术产品,也就是精神产品的设计中经常强调创意,甚至有所谓创意产业的说法,而在工程领域的设计中则很少看到创意这个词. 寻求创意是设计中解决现在未能满足需求的最核心的步骤,所以说:创意引领设计! Hatchuel 认为 C-K 理论与实用主义设计理论相比是唯一能够在设计中包含创意的理论^[15],然而他并没有给出创意产生的机制. 创意来自直觉和灵感,脑科学正在深入研究产生灵感的脑思维、脑生理和脑结构之间的联系,不过从知识流动角度也可以推想创意产生的机制,图 2 是这个推想的一个模型.

对于现在未能满足的需求,先要以如同看显微镜的精细来锁定关键难点. 设计以已有知识为基础定律告诉人们,包括形成创意在内,设计都不能脱离已有知识. 关键难点一般不会有现成的解,面对关键难点,设计师要有意识地将已有知识分解成碎片,与关键难点逐一比较、相互启发、重新拼接直至闪现一个可能解的想象. 图 2 形象化地给出这个将已有知识打碎、发酵(启发)和编织的过程. 人们常说创意来自直觉和灵感,其实这是在知识海洋中苦苦思索的

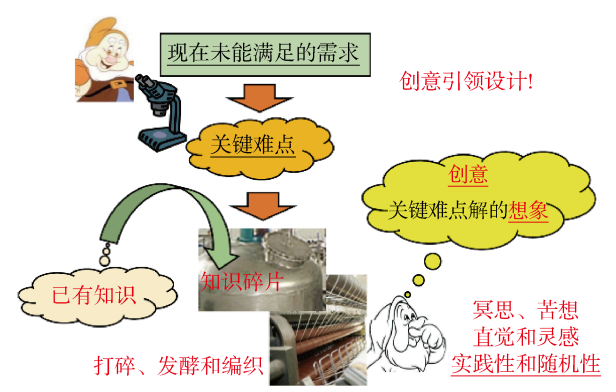


图 2 创意产生的一个模型^[16]

Fig. 2 Model of breeding a creative idea^[16]

和运用所有相关的知识. 法律是必须遵守的底线, 而道德则是人的行为的标杆. 一旦万众创新成为现实, 人人都为人类的美好生活和和谐发展设计, 社会就会达到一个理想的境地.

4 结语

能够为达到目的, 集成知识以规划实施和实施结果的面貌, 也就是能够设计, 是人类区别于其他动物的重要标志. 所谓实施, 可以是个人行为, 也可以是人的群体行为, 也可以是受人或者人的群体操纵的其他人、人的群体或者非人事物的行为. 人的一切有目的活动都可以分为设计和实施两个部分. 从工业化生产开始, 关于设计的研究越来越向纵深发展, 主要体现在各个专业领域设计学的发展上. 本来, 设计科学与设计学在概念上没有什么差别, 不同专业领域的设计学专注于自己领域的设计问题也无可非议, 建筑领域形成了建筑领域的设计学, 机械领域形成了机械领域的设计学, ……结果设计学发展成为一种固定的模式, 显然不同于 Gropius 和 Fuller 理想的设计科学. Simon^[5]写过: “很少有工程师和作曲家能够进行一场关于各自专业工作内容的有共同价值的对话. 然而我认为他们可以进行关于设计的这样一种对话. 这就可以发现他们都在从事相同的创造性活动, 可以分享他们在创造性的专业设计过程中的经验.” 这说明, 不管专业的差别有多大, 设计都有其跨越专业范畴的共性的问题需要研究. 这些问题甚至比专业领域设计问题的解决对于设计更为重要. 从个体看, 随着物质需求已经比较容易满足, 精神需求和社会需求就突显出来, 物质、精神和社会需求同时满足越来越成为广大人群而不再是少数达官显贵的追求, 人的需求越来越突破专业领域的范畴; 从社会看, 全球经济一体化、物流和信息技术突飞猛进带来的跨领域事务与日俱增, 这就导致跨学科设计的共性问题研究的重要性更加突出, 设计科学也就理所当然地重新被提到重要的研究日程上.

致 谢 感谢国家自然科学基金长期对我们团队在设计科学研究上的鼓励和支持. 感谢刘昂、孟祥慧、陈泳、张执南、李响同志审阅本文初稿并提出许多非常重要的修改意见.

参考文献:

- [1] 谢友柏. 设计科学的争论和设计竞争力 [J]. **中国工程科学**, 2014, 16(8): 4-13.
- XIE Youbai. Controversy on design science and

- competitiveness of design [J]. **Engineering Science**, 2014, 16(8): 4-13.
- [2] YORAM R. Designing science [J]. **Research in Engineering Design**, 2013, 24(3): 215-218.
- [3] Wikipedia. Walter Gropius [EB/OL]. (2016-10-23) [2018-11-21]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Walter_Gropius&oldid=745863078.
- [4] Wikipedia. Buckminster Fuller [EB/OL]. (2016-10-26) [2018-11-21]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Buckminster_Fuller&oldid=746259182.
- [5] CROSS N. Designerly ways of knowing: Design discipline versus design science [J]. **Design Issues**, 2001, 17(3): 49-55.
- [6] PAHL G, BEITZ W. Konstruktionslehre [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1977.
- [7] PAHL G, BEITZ W, FELDHOUSEN J, *et al.* Engineering design: A systematic approach [M]. London: Springer-Verlag, 2007.
- [8] SUH N. The principle of design [M]. New York: Oxford University Press, 1990.
- [9] SUH N. 公理设计——发展与应用 [M]. 谢友柏, 袁小阳, 徐华, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- SUH N. Axiomatic design: Advances and applications [M]. XIE Youbai, YUAN Xiaoyang, XU Hua, *et al.* trans. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [10] 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 Youbai. Study on the modern design theory and methodology [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2004, 40(4): 1-9.
- [11] GERO J. Design prototypes: A knowledge representation schema for design [J]. **AI Magazine**, 1990, 11(4): 26-36.
- [12] GERO J, KANNENGIESSER U. The situated function-behaviour-structure frame-work [J]. **Design Studies**, 2004, 25(4): 373-391.
- [13] HATCHUEL A, WEIL B. A new approach of innovative design: An introduction to C-K theory [C]// **Proceedings of ICED'03**. Stockholm, Sweden: ICED, 2003.
- [14] HATCHUEL A, MASSON P, WEIL B. C-K theory in practice: Lessons from industrial applications [C]// **International Design Conference-Design 2004**. Dubrovnik, Croatia: IDC, 2004.
- [15] HATCHUEL A, WEIL B. C-K design theory: An advanced formulation [J]. **Research in Engineering Design**, 2009, 19: 181-192.
- [16] 谢友柏. 关于《设计科学与设计竞争力》的写作 [J].

- 中国机械工程, 2018, 29(4): 499-503.
- XIE Youbai. The creation of "Design science and design competitiveness"[J]. **China Mechanical Engineering**, 2018, 29(4): 499-503.
- [17] 谢友柏. 设计科学与设计竞争力[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- XIE Youbai. Design science and design competitiveness[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [18] 谢友柏. 设计科学中关于知识的研究——经济发展方式转变中要考虑的重要问题[J]. **中国工程科学**, 2013, 15(4): 14-22.
- XIE Youbai. Study into the knowledge in design science—Some important issues should be considered in mode transformation of economic development[J]. **Engineering Science**, 2013, 15(4): 14-22.
- [19] XIE Y B. Four basic laws in design science [J]. **Engineering Sciences**, 2014, 2(12): 2-9.
- [20] 刘郡. 分布式资源环境下产品设计中功能-结构-行为知识的集成理论与方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- LIU Jun. Function-structure-behavior knowledge integration for product design in distributed resources environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [21] 谢友柏. 现代设计理论中若干基本概念研究[J]. **机械工程学报**, 2007, 43(11): 7-16.
- XIE Youbai. Some basic concepts in modern design theory[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2007, 43(11): 7-16.
- [22] 李响. 面向开放式创新的产品集成设计理论与方法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- LI Xiang. Research on open innovation-oriented product integrated design theory and methodology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [23] LIU J, CHEN B, XIE Y B. An improved axiomatic design approach in distributed resource environment. Part 1: Toward functional requirements to design parameters transformation[J]. **Procedia CIRP**, 2016, 53: 35-43.
- [24] CHEN B, LIU J, XIE Y B. An improved axiomatic design approach in distributed resource environment. Part 2: Algorithm for function unit chain set generation [J]. **Procedia CIRP**, 2016, 53: 44-49.
- [25] 曹远国. 挖掘机工作装置全生命期性能数字样机研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- CAO Yuanguo. Research on the life time performance simulation of the front linkage of an excavator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [26] 谢友柏. 回归教学, 责无旁贷——亲历我国高等工程教育 50 年[J]. **高等工程教育研究**, 2006, 4: 8-13.
- XIE Youbai. Priorities for improving teaching quality should be refocused without hesitation[J]. **Research in Higher Education of Engineering**, 2006, 4: 8-13.
- [27] 王扬宗. “韩春雨事件”余波未了, 重塑学术生态任重道远[N]. **中国科学报**, 2018-09-03(3).
- WANG Yangzong. A long way to reconstruct academic ecology: The aftermath of “Han Chunyu Event” [N]. **China Science Daily**, 2018-09-03(3).
- [28] 潘希, 王小凡. 不赞成“弯道超车”[N]. **中国科学报**, 2018-10-29(1).
- PAN Xi, WANG Xiaofan. Disapproval of “overtaking on a bend”[N]. **China Science Daily**, 2018-10-29(1).
- [29] 卡尔·马克思. 资本论(纪念版), 第一卷[M]. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局编译. 北京: 人民出版社, 2018: 829.
- MARX Karl. Capital (anniversary edition), Vol. 1 [M]. The Compilation Bureau of the Central Committee of the Communist Party of China for Books by Marx, Engels, Lenin and Stalin. Beijing: People's Publishing House, 2018: 829.
- [30] Wikipedia. Kaon model [EB/OL]. (2018-10-02) [2018-11-21]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kano_model&oldid=862118270.
- [31] Wikipedia. Maslow's hierarchy of needs [EB/OL]. (2018-10-28) [2018-11-21]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maslow%27s_hierarchy_of_needs&oldid=864698465.

(本文编辑: 蒋霞)