

【特别策划】

突破性创新与突破性创新设计研究综述

檀润华, 王凡凡, 张俊磊, 刘芳
(河北工业大学, 天津 300401)

摘要: **目的** 将突破性创新设计从突破性创新与创新设计研究中分离出来进行专题分析。**方法** 采用跨学科横向关联的方法, 通过文献检索, 分析技术创新管理领域关于突破性创新的研究成果, 并归纳了 3 个主题。分析了设计与工程设计、创新设计的特征, 并将创新设计分为 3 类, 其中一类是突破性创新设计, 最后对突破性创新设计所涉及内容进行文献分析。**结论** 实现了 Leifer 等提出的突破性创新的 3 个基本特征, 这些特征的实现也是突破性创新设计成功的参考。突破性创新设计是创新设计的一类, 其关键是通过已有跨学科效应或跨行业技术的搜索与应用, 实现核心技术的突破。突破性创新设计过程包括机遇识别、突破性技术实现等关键阶段, 在 C-TRIZ 框架下已构建了几种过程模型, 并可供企业参考。技术创新管理领域中关于突破性创新的研究, 为突破性创新设计提供特征参考, 两类研究属于不同领域, 但可形成上下游关系。这种观点为创新设计跨学科研究提供了一种新思路。

关键词: 突破性创新; 创新设计; 突破性创新设计; 机遇识别; 突破性技术; 设计过程模型

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)18-0009-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.18.002

Study of Radical Innovation and Radical Innovative Design

TAN Run-hua, WANG Fan-fan, ZHANG Jun-lei, LIU Fang
(Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: The paper aims to separate the radical innovative design from the radical innovation and innovative design as an independent design method for thematic analysis. The basic method for study is interdisciplinary literature search both in technological innovation management and design. The first, three topics is divided from the studies of the technological innovation management. Then, the analysis is carried out for the studies of the design, engineering design and innovative design. The innovative design is divided into three types and the radical innovative design is one of them. The opportunities, key implement methods for radical technologies and process models for radical innovative design is analyzed. Some conclusions are drawn from the literature analysis. The first is that the three features of radical innovations given by Leifer can be the key features for radical innovative designs. The second, the radical innovative design is a kind of innovative design in which interdisciplinary knowledge and technologies are searched and applied. The topics for the radical innovative design are opportunity identification, radical technology implementation and design process model development. Under C-TRIZ framework a few design models for radical innovation have been developed. The last, the both studies in the technological innovation management and the design for radical innovation can be reference each other. This view is a new thinking for interdisciplinary study of innovative designs.

KEY WORDS: radical innovation; innovative design; radical innovative design; opportunity identification; radical technologies; design process model

收稿日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675159); 中央引导地方科技发展专项资助项目 (18241837G); 国家创新方法专项 (2020IM020600)

作者简介: 檀润华 (1958—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为创新设计。

经济全球化致使技术与产品竞争白热化,而逆全球化凸显我国关键技术被“卡脖子”依然存在^[1]。改变这种局面的措施之一是我国更多的企业实施突破性创新战略^[2]。突破性创新可以毁灭原有的价值链结构,产生新的价值网络,从而带动整个技术竞争节点、市场格局和产业结构的再造与重塑^[3]。如 4G 到 5G 的突破性创新,带来了网络速度的跨越式提升,开拓了医疗、智慧城市、智能交通和工业物联网等方面广阔的蓝海市场,也成就了华为在 5G 时代的领导者和标准制定者的地位。大力投入突破性技术与产品开发,不仅是中国装备制造业实现转型升级,构建创新优势的主动选择^[4],也是企业 and 国家推进突破性创新能力构建的必然选择。突破性创新过程包含设计过程,该过程实现从原有技术轨道向新技术轨道的跨越,是典型的创新设计过程。

国家实施创新驱动发展战略使创新设计得到全社会的关注。2013 年 8 月,中国工程院启动了“创新设计发展战略研究”重大咨询项目,众多专家学者参加该项目的研究,其成果已写入《中国制造 2025》,用于指导企业创新设计。中国机械工程学会组织编著《中国机械工程技术路线图》包含创新设计一节^[5]。路甬祥院士^[6]出版专著《论创新设计》,并撰写了“创新设计竞争力研究”一文^[7]。谭建荣院士^[8]、徐志磊院士^[9]分别撰写了创新设计专题论文。中国好设计大赛吸引了众多企业参加,充分展示了企业对创新设计的重视。

创新设计是企业产品创新过程的一个阶段。从管理的视角研究产品创新要素与过程管理是技术创新管理的研究内容,该领域研究的基本思想、观点与成果^[10]必然对创新设计产生影响,如突破性创新实现路径^[11]和对国家与企业发展的影响^[12],在该领域已有较多研究。然而,在设计领域,将技术创新管理理念、方法、成果引入创新设计过程,并进行跨学科研究实属罕见。本文从突破性创新的视角出发,对技术创新管理领域突破性创新研究与发展、创新设计、突破性创新设计等 3 个方面的研究进行跨学科整理分析。

1 突破性创新

1.1 突破性创新的特征

突破性创新是一类创新程度高、创新影响力大的创新活动。该类创新能够完成技术轨道的跃迁,具有颠覆原有形式、变革市场的重要意义。突破性创新存在研发难度大、不确定性高、早期优势不显著等问题,但随着技术难题的克服,产品性能的快速上升使其性能极限超过原有的技术轨道,实现 S 曲线的跃迁,见图 1。在突破性创新关键特征的界定方面,Leifer 等^[13]认为满足 3 个特征之一可被视为突破性创新(提供全新的技术,或主要性能指标提高 5 倍及以上,或产品成本至少降低 30%)。技术创新管理领域对突破性创

新的研究经历了概念萌芽阶段、概念发展多样化阶段,后一类包含实现路径的研究。

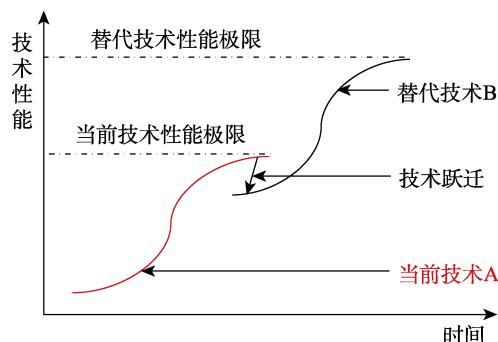


图 1 突破性创新的 S 曲线
Fig.1 The S-curve of radical innovation

1.2 概念的萌芽时期

尽管关于突破性创新的研究可以追溯到熊彼特 1921 年出版的《经济发展理论》，但绝大多数关于突破性创新的研究都以 Leifer 等提出的突破性创新 3 个主要特征为切入点。考虑到突破性创新技术轨道的不连续特征,1982 年 Dosi^[14]关于“技术范式”与“技术轨道”关系的论证,也是重要的突破性创新研究起点。该文将突破性创新与渐进性创新统一到一个理论框架之内,并指出技术轨道的发展与技术范式有关,不连续的技术轨道则与新范式的出现有关。1995 年 Ehrnberg^[15]进一步指出突破性创新中新技术范式出现的原因主要分为 3 类:新兴产业的出现、已有产业中新旧技术替代、新技术和新技术发展子循环中的替代。依据上述分析,Ehrnberg 进一步建立了不同主导设计模式下的技术轨道不连续发展模型,分为并行技术轨道和串行技术轨道,见图 2。

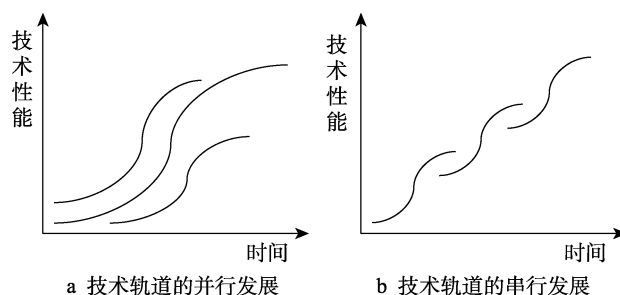


图 2 突破性创新的 2 种技术轨道^[15]
Fig.2 Two technology trajectories for radical innovation^[15]

图 2 中并行轨道主要描述在某一产业兴起的时候,技术处于酝酿阶段,多种技术同时涌现,主导技术尚未出现,存在多种不同的可行性技术发展路线。经过多方面的发展,最终某一占据优势的技术胜出,并成为行业的主导技术。串行技术的出现更多的是新旧技术替代、新技术和新技术发展子循环中的替代。这些关于技术轨道发展规律的研究构建了突破新创

新的早期概念, 属于突破性创新概念的萌芽时期。

1.3 概念的多样化发展时期

围绕对突破性创新的特征总结, 学者们进一步从技术演化、技术轨道转换、技术创新结果等单一视角或多视角综合的方向对突破性创新做进一步的分析和概念界定。关于突破性创新的研究也随之进入了快速增长时期。Mcdermott 等^[16]从创新的结果评价出发, 将突破性创新定义为能为公司和市场创造新业务的一类创新, 其形成途径仍然从突破性创新的主要特征出发。Kasmire 等^[17]认为所有对未来发展产生深远影响的创新都可以称之为突破性创新; 如全新的研究领域, 淘汰现有主导地位的竞争技术或生产流程。Davenport^[18]和 Forés 等^[19]提出突破性创新是指那些对现有服务提供的改变, 这种改变来源于新的技术或新的产品架构; 显然, Davenport 和 Fores 定义了广义上的产品, 即产品应该包括有形产品和无形产品。而 Verganti^[20]从产品语义学角度研究了设计与创新的关系, 并从该视角定义了突破性创新: 产品语义具有重大突破的一类创新, 包括那些被重新赋予新的、重大意义的既有产品也属于突破性创新; 例如手表从显示时间的原始意义到身份象征意义的转变就属于突破性创新。

上述关于突破性创新的定义主要是从市场化和商业化的视角给出的分析。后期学者们继续对这种市场化和商业化的现象进行了深入研究。Story 等^[21]、O'Connor 等^[22]相继提出如果一项创新在性能特征方面有了前所未有的改进, 并且可以进行应用开发, 那么该类创新属于突破性创新。该定义是从突破性创新能提供前所未有全新性能特征的产品或者服务视角出发, 同时考虑了设计规范的概念, 因为“前所未有的改进往往是偏离当前技术设计轨道的再设计。Sood 等^[23]进一步验证了技术轨道进化发展的路径, 并指出技术进化并不是遵循单一的 S 曲线, 而是一个不断向上的阶段函数, 随着时间的推移, 产品性能较前技术会有大幅度的提高, 这种情况称之为突破性创新。

在此期间, 国内学者也对突破性创新的定义进行了多样化的研究。张洪石等^[24]指出突破性创新是导致产品性能主要指标发生巨大跃迁, 或者对市场规则、竞争态势、产业版图具有重大影响, 甚至可能导致产业重新洗牌的一类创新。陈劲等^[25]认为突破性创新是指基于突破性技术的创新。薛红志等^[26]认为突破性创新是建构在全新的知识基础上, 并对主导企业核心能力产生替代、破坏的一类创新。张金柱等^[27-28]指出突破性创新是指技术创新的方法、产品、设备、材料等技术主题发生不连续性变化, 并引发性能的跃迁或功能的变化, 最终导致市场、产品、服务、商业模式等发生不连续性变化。赵息等^[29]则认为突破性创新是以全新的产品、生产方式和竞争形态, 对市场与产业做出颠覆性改造的创新模式。郭小超等^[30]采用知识图

谱的方法研究突破性创新的特征。

总之, 突破性创新的概念与形成的路径特征已清晰, 企业创新实践中也已证明该类创新的重要性。企业急需应用的是突破性设计方法, 即构建突破性、程序性设计过程模型, 企业设计人员可应用该模型完成突破性创新设计, 为后续制造并推出突破性产品奠定基础。技术创新管理领域已有的研究成果可以作为创新设计研究的上游知识加以应用。

2 创新设计

2.1 设计与工程设计

设计过程起始于需求的概念描述到被设计对象或产品的详细描述, 产品是意图驱动的结果。设计是有意识、有目的的一系列活动, 其结果是使某事件从未满足需求的状态达到一个新满足需求的状态。设计是人们需要改变所涉及环境的一类活动。

设计有各种定义。如设计是按照任务的目的和要求, 预先定出工作方案和计划, 绘出图样; 设计是把一种计划、规划、设想, 通过视觉的形式传达出来的活动过程; 设计是把一种设想, 通过合理的规划与周密的计划, 以各种感觉形式传达出来的过程; 设计是对未来的工程“制造物”及其建造过程的构思与设想, 用图纸、模型、方案等来表达。设计是一个过程, 该过程起始于功能需求, 终止于满足功能需求的产品的表达, 这种表达应足够详细到产品的制造、整合与建造。

与设计活动紧密相关的几个概念是目的、功能、行为与结构^[31]。目的是意向或意图驱动做某事的行动或事实, 目的也可简单定义为意图。功能是执行、履行或实施的行动。行为是在某种特定条件或环境下, 某事物执行或作用的方式方法。结构是在关系协调的条件下, 由各部分或元件所构成的具有独特性质的总体。结构表示“是什么 (What is)”, 行为表示“怎样做 (How Does)”, 功能表示“做什么 (What Does)”, 目的表示“为什么要做 (Why Does or What for)”。

上述几个概念之间的关系概括如下: 结构展示行为, 行为导致功能, 功能实现目的; 或目的由功能实现, 功能由行为导致, 行为由结构展示。

结构是给定物理环境中产品所处的状态, 在该环境中呈现出特定的行为; 这些行为孕育出各种功能; 而功能的实现很好地诠释了人们需要产品存在的目的。结构、行为、功能属性可以体现产品满足人们需求的价值。

Trott^[32]将设计分为 3 类: 工程类、日用消费类、时尚类, 见表 1。不同类型的设计所关注的重点不同, 工程设计关注工程解决方案, 日用消费品类设计关注形态概念的产生, 而时尚类设计关注变化或流行趋势, 见表 2。不同类型的设计所用的知识也不同。本文综述的重点是工程设计或该类产品的突破性创新, 因此工程设计是重点。

表 1 设计活动的范围
Tab.1 Scope of design activities

工程类	日用消费类	时尚类
机械	工业设计	市场/社会变化
电子	外观	样式
化工	人为因素	客户希望
制造	需求质量	

表 2 设计活动的影响方面
Tab.2 Impact aspects of design activities

工程解决方案	形态概念	变化趋势
功能设计	形态	时尚
成本有效性	颜色	样式
制造可行性	图样	情感
	包装	包装
	人机工程	

工程设计是在满足各应用领域需求,不断总结机械、建筑、化工、水利等工程设计方面的理论、方法和设计经验的基础上,综合系统工程、价值工程、创造工程、优化设计、决策学等自然科学和社会科学的多种理论所构建。工程设计经历了自发阶段、自觉阶段、计算机辅助的现代阶段。自发设计阶段又称直觉设计阶段,设计过程主要依靠直觉摸索和设计灵感,主要依赖于设计者的经验。第 2 个发展阶段是 16 世纪后,随着数学、物理等基础自然科学的发展,人类在工程设计过程中开始自觉应用自然科学知识,设计过程由自发阶段走向自觉阶段,工程设计学理论逐渐建立形成,设计的可靠性大大增加。第 3 个阶段是计算机辅助的现代设计阶段,设计过程面向制造、分析、工艺等,并向着智能化设计发展。

工程设计需用工程方法产生有用装置的表征,该表征的产生需包含分析与综合 2 个主要阶段。分析阶段详细确定设计规格说明与产品的功能,综合阶段确定各个元件与部件,并指出它们之间可能的相互关系。

工程设计是一个复杂的过程。针对设计复杂性,形成的设计过程不是简单的一个顺序过程,经过多年的研究,已提出多个设计过程模型。Cross^[33]将这些模型归为描述型(Descriptive Models)与规定型(Prescriptive Models)两类过程模型。前者对设计过程中可行的活动进行描述,后者规定设计过程所必需的活动。Pahl 等^[34]的工程设计模型是一类典型的规定型过程模型,在国际工程设计领域应用最为广泛,被称为经典设计理论。

2.2 创新设计及其特征

创新设计是面向企业产品创新需求,通过设计创造新颖、具有独特价值且为企业带来长期经济效益的产品。该类设计是形式与情景之间的匹配过程,形式是解决方案,情景是未来新产品所处的环境。创新设

计的核心是解决情景所诱发的设计难题,其结果形成发明,经过后续的开发过程,形成具有市场推广意义及商业价值的产品。

创新设计是一个合理化的问题解决过程,是打破已有规则而产生新规则的过程。创新设计不仅涉及产品,也涉及组织与市场创新。Zhang 等^[35]认为创新设计应表现出三方面特性:创新设计的结果与已有的产品均不同、创新设计结果的价值应由用户与市场直接评价、创新设计与已有设计类型的区别是其涉及商业化的转变。孙守谦等^[36]认为创新设计是一种跨学科融合的集成创新,由技术、艺术、文化、人本与商业 5 类构成要素组成。胡洁等^[37]研究了创新设计中创新源泉、创新机制和评价机制,并提出创新设计不仅需重用本领域的设计知识,而且需要跨领域多学科知识的激励。邓卫斌^[38]等在概念设计阶段利用参数化的设计思维方法,创造可以激发设计师灵感的环境,启发其更好地进行产品创新设计。李丽等^[39]为解决产品造型风格创新设计过程中存在模糊性、不确定性和缺乏创新性等问题,提出从原型角度展开产品造型风格创新设计。这些研究涉及创新设计的内涵、源泉、过程、方法与跨学科知识的运用。

按照技术创新管理研究中关于创新的分类,并根据设计结果的差异化和技术系统进化原理,将作为工程设计子类的创新设计分为渐进性创新设计、突破性创新设计和破坏性创新设计 3 类^[40]。

1) 渐进性创新设计。是通过不断地、渐进地、连续地改进已有技术系统或产品而实现的一类创新,通常表现为产品技术进化过程中在同一条 S 曲线上不断递增的过程,其核心是不断地发现并解决冲突,设计结果与已有产品的差异性程度较低。

2) 突破性创新设计。是以全新、新型的产品生产制造方式或工艺过程产生新型的竞争形态,而对市场和产业带来颠覆性变革的一类创新。通常表现为原始创新或产品技术进化过程中,2 条 S 曲线间的自然更迭,其结果可大幅提升产品的性能和企业的生产效率,与已有设计存在显著差异性。

3) 破坏性创新设计。是用低于主流市场上定型产品性能的产品取代主流产品,是实现跨越的一类创新。通常表现为产品进化过程中位于成熟期的分支点,分为低端破坏和新市场破坏,其创新设计结果是对市场结构带来颠覆性变化,因此其结果也被称为颠覆性创新。

3 突破性创新设计

突破性创新设计研究涉及突破性创新机遇发现、技术实现与设计过程模型构建,其结果要形成能用于企业突破性创新设计实践的系统化方法。

3.1 突破性创新机遇发现方法

在商业语义中,机遇是一次可以被创造与发展的

成功尝试, 突破性创新机遇来源于变化(如知识、技术、经济、政治、社会、人口结构、地域等的变化)。机遇的识别取决于已有的经验与方法的应用, 经验与方法使人们将无关的变化、知识或事件等连接在一起, 并形成机遇。机遇的识别有多种方法, 如基于变化识别的方法、需求进化的方法、裁剪与功能重组的方法、功能集成的方法与情景分析法等。

基于变化识别的方法: 如 Drucker^[41]给出了激发企业创新的外部变化与内部变化。外部变化为人口状况的改变、理解及意义的改变、新知识的应用。企业内部变化为意外的成功或失败、不协调现象、基于流程需要的创新、产业或市场结构的改变。这些变化如果影响到待研究的产品, 可以通过原型法或案例法^[42]确定突破性创新机遇。

基于需求进化的方法: Kano 模型^[43]定义了基本型、期望型和兴奋型三个层次的用户需求。其中兴奋需求要提供给用户一些完全出乎意料的产品属性或服务行为, 使用户产生惊喜, 该类需求能成为一种突破性创新机遇。需求进化定律的应用是另一种通过需求进化的机遇识别方法。Petrov 定义了需求进化理想化、需求进化动态化、需求进化协调化、需求进化集成化、需求进化专门化 5 条定律^[44], 向需求进化理想化变化是总体趋势。可根据这 5 条定律预测未来可能的用户需求变化, 并以此确定突破性创新机遇。

裁剪与功能重组方法^[45]: 裁剪是 TRIZ 中一种用于产品结构创新的方法, 依据已建立的功能模型, 识别问题功能, 对问题功能和相关功能实施裁剪, 裁剪后的系统应实施功能重组, 为保障功能的不变性, 需要构建新功能。新功能的出现成为突破性创新机遇。

功能集成方法^[46]: 通过功能或技术集成, 形成新功能, 该类功能的实现形成了突破性创新机遇。也可以通过近缘与远缘功能的集成, 形成具有多个主功能的产品, 能够满足用户多方面的需求。

情景分析方法^[47]: 以原型产品典型实践性情景作为初始场景, 对情景条件中的初始核心情景要素、用户关联要素和环境关联要素, 采用不同的情景操作策略, 探索未来可能的新的情景要素及特征, 并通过形态学矩阵组合为新的未来情景条件, 发现产品集成到不同情景条件下的特征要求。同时提出支持情景预期演化的演化原理发现过程, 进而发现实现此原理产品应具备作用特征, 作为创新机遇。该方法可用于突破性创新机遇识别。

3.2 突破性技术实现方法

选定一个或多个需要改变工作原理的功能后, 需要引入新知识, 确定新的工作原理或原理解, 这些选定的功能称为关键功能。为了提高产品某项性能的物理极限, 所引入的新知识通常是跨学科的知识。学者们已给出了功能实现的一系列方法, 这些方法用于关

键功能的实现, 其结果可以产出突破性技术。

类比方法: 类比方法是基于类比推理的功能求解方法^[48]。类比涉及源与目标两类事物, 源是熟悉的事物或已存在的问题, 目标是新的事物或待解决的问题。类比的过程是根据源与目标在一系列属性上相同或相似, 而且已知其源还具有其他特定属性, 由此推出目标也具有同样的其他特定属性的结论^[49], 或认为类比是将知识从源转移至目标的过程, 转移的依据是源与目标 2 个情境间有着某种相似性。如果源或源设计与目标或目标设计的功能相同, 通过知识转移的方法, 源设计可为目标设计提供潜在的解决方案。基于认知科学中对类比推理过程的研究, 类比设计包括设计知识存储和表征、检索、目标设计和源设计之间的知识映射和转移、目标设计方案的产生^[50-51]。因此, 应用类比方法, 可以实现技术的突破。

功能导向搜索方法(FOS): 该方法由 Litvin 等^[52]提出。当确定关键功能后, 以功能作为关键词进行技术搜索, 以确定实现该功能在不同领域内的成熟技术, 经过评估后将成熟技术引入本领域并实现突破性创新, 所搜索的领域应该是不同的工业领先领域, 如航空航天、军工、机器人等领域。该方法的优点是跨行业搜索得到的技术已经成熟, 将其移植到本领域风险较小。

功能-效应搜索方法^[53-54]: 对已确定的关键功能, 应用数学、物理、化学、生物等基础学科或跨学科中的效应可以确定其新的原理解, 该原理解可实现产品性能物理极限的提升, 从而实现技术的突破。因此, 关键功能可通过效应来实现, 并得到突破性技术。

功能-行为-效应-原理-结构方法(FBOS)^[55]: 该方法是功能-行为-结构(FBS)的进一步发展。其中的行为可以是机械、声学、热力学、电学、磁学等不同的行为。效应是某类行为之下的不同效应, 如可以通过摩擦、振动或挤压效应产生力。原理即是将效应应用简单图形结构表征的原理解。结构是将原理解表征为准确且精细的结构。由于采用不同的效应, 可以产生突破性技术解决方案。

技术进化^[44,53-55]方法: TRIZ 中的技术进化系统由技术进化定律与进化路线构成, 技术进化定律代表技术进化的方向, 某定律下的一条进化路线代表技术从低级到高级进化的不同状态。将关键技术的技术实现与选定定律和路线的进化状态对比, 确定潜力状态, 这些潜力状态的实现可能是突破性技术。

以上这些方法可单独应用, 也可综合应用。

3.3 突破性创新设计过程

以 Leifer 等^[52]所提出的突破性创新 3 个特征之一为参考, 构建从机遇识别、关键功能确定、突破性技术搜索与实现、后续设计过程实现的系统化模型, 形成结构化方法。

C-TRIZ^[53]已构建一类基于突破性发明的突破性创新设计过程模型。该模型首先以形成突破性发明为基础,其次完善后续的设计过程,最终形成突破性产品创新设计。突破性发明包括机遇发现、机遇分析、突破性发明设想产生、设想评价与概念产生 4 个部分。机遇确认是根据企业需要和市场环境状况,选择一种目标产品,对目标产品进行技术成熟度预测,如果目标产品已到成熟期,符合突破性创新的时机,就需要考虑进行突破性发明创新。机遇分析是建立所选产品关系型功能模型,根据元件间相互作用的关系,确定产品技术系统的主功能,建立产品核心技术子系统物质—场模型,确定主功能的工作原理,选择一个需要强化的技术子系统,针对此子系统技术结构进行技术进化预测,确定技术潜力状态,即为突破性发明的技术机遇。突破性发明设想产生是利用类比、功能导向、FBOS 等方法搜索所需知识或技术进行整合,并形成突破性发明的技术方案。设想评价和概念产生是根据企业实际情况对可以实现的设想进行评价并产生最终创新设想,然后经过概念设计阶段的完善,形成领域解,即突破性创新的产品原理解。之后可以

进入传统的新产品开发阶段,最终开发出满足市场需要的突破性创新产品。

Wang 等^[56]构建了一类以 LT 表为基础的突破性创新设计模型。LT 表是将物理量用长度 L (Length) 和时间 T (Time) 二维量纲表示后汇总的表格。Bartini^[57]提出了物理参数量纲化的具体方法,系统研究了物理常量之间的关系,建立了一个由长度 L 和时间 T 2 个基本量表示的运动学系统的各物理量。Wang 等构建了一类系统化突破性创新设计过程模型 (ESM),包括问题确定、功能分析、关键功能选择、效应搜索与选择、结构构建与评估等几个阶段。其中效应搜索部分采用 LT 表的方法。

图 3 给出了另一种突破性创新设计过程模型^[40]。该模型细分为 7 个步骤:突破性创新的技术机遇分析、初步设想产生、设计要素分析、功能设计、资源匹配、效应推导、技术原理方案的结构设计。该过程还包含 3 次评估,分别为“初步设想合理性验证”“技术方案可行性验证”和“方案结构合理性验证”,评估合格继续,否则需返回到之前的相关步骤,最后完成设计任务。

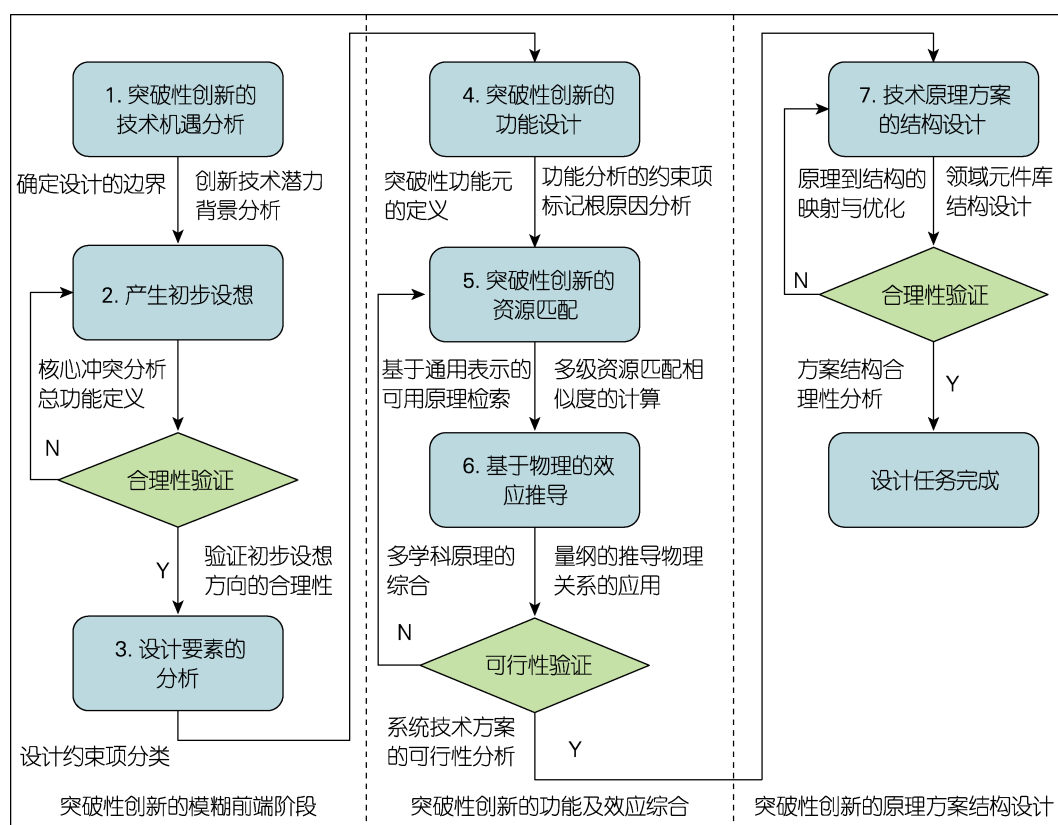


图 3 突破性创新设计过程模型
Fig.3 Radical innovation design process model

4 结论

突破性创新是对市场和产业带来颠覆性变革的一类创新。目前已有的研究表明,实现 Leifer 等

提出的 3 个基本特征之一是该类创新成功的指标。这些特征的实现也是突破性创新设计成功的参考。

突破性创新设计是创新设计的一类,其关键是通过已有跨学科效应或跨行业技术的搜索与应用,实现

核心技术的突破。该类创新设计难度大,风险高,但对提升企业的竞争力具有战略意义。

突破性创新设计过程模型是企业急需的一类设计方法。突破性创新机遇识别方法和突破性技术实现方法是该过程的关键阶段。在C-TRIZ框架下已构建了几种过程模型,并可供企业参考。目前的研究与Pahl等所构建的设计过程模型相比还有很大的发展空间。

本文将技术创新管理领域关于突破性创新的研究成果与突破性创新设计进行了横向关联,使不同领域的平行研究成为上下游关系。下游借鉴上游的研究成果,上游参考下游的研究方法与目标,这为创新设计跨学科研究提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] 张军,陈劲.破局“卡脖子”技术突破的战略与路径[M].北京:科学出版社,2022.
ZHANG Jun, CHEN Jin. Breaking the Bureau: the Strategy and Path of "Sticking the Neck" Technology Breakthrough[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [2] 陈光,钟方媛,明翠琴,等.中国突破性创新的理论模式与实践研究[J].软科学,2021,35(10):22-30.
CHEN Guang, ZHONG Fang-yuan, MING Cui-qin, et al. Study on Theoretical Model and Practice of Breakthrough Innovation in China[J]. Soft Science, 2021, 35(10): 22-30.
- [3] AHUJA G, MORRIS LAMPERT C. Entrepreneurship in the Large Corporation: A Longitudinal Study of how Established Firms Create Breakthrough Inventions[J]. Strategic Management Journal, 2001, 22(6-7): 521-543.
- [4] 邵云飞,詹坤,吴言波.突破性技术创新:理论综述与研究展望[J].技术经济,2017,36(4):30-37.
SHAO Yun-fei, ZHAN Kun, WU Yan-bo. Breakthrough Technology Innovation: Literature Review and Prospect[J]. Technology Economics, 2017, 36(4): 30-37.
- [5] 中国机械工程学会.中国机械工程技术路线图2021版[M].北京:机械工业出版社,2022.
Chinese Mechanical Engineering Society. Technology roadmaps of Chinese mechanical engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [6] 路甬祥.论创新设计[M].北京:中国科学技术出版社,2017.
LU Yong-xiang. On innovative design[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2017.
- [7] 路甬祥.创新设计竞争力研究[J].机械设计,2019,36(1):1-4.
LU Yong-xiang. Research on Competitiveness of Innovation Design[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(1): 1-4.
- [8] 谭建荣,张树有,徐敬华,等.创新设计基础科学问题研究及其在数控机床中的应用[J].机械设计,2019,36(3):1-7.
TAN Jian-rong, ZHANG Shu-you, XU Jing-hua, et al. Research of Basic Science Problems of Innovative Design and Application in CNC Machine Tools[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(3): 1-7.
- [9] 徐志磊,董占勋,于钊.创新设计新思维[J].机械设计,2019,36(4):1-4.
XU Zhi-lei, DONG Zhan-xun, YU Zhao. New Thought of Innovation Design[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(4): 1-4.
- [10] 王巍,李德鸿,侯天雨,等.多重网络视角下突破性技术创新的研究述评与展望[J/OL].科学学与科学技术管理,2022:1-19.(2022-06-02).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1117.g3.20220530.1823.014.html>.
WANG Wei, LI De-hong, HOU Tian-yu, et al. A Review and Prospect of Breakthrough Technology Innovation in Multiple Networks[J/OL]. Science of Science and Management of S & T, 2022: 1-19. (2022-06-02). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1117.g3.20220530.1823.014.html>.
- [11] 蒋瑜洁,郭婷,王尚可,等.新兴国家如何实现突破性技术创新——基于中美V2X专利数据对比分析[J].科学学研究,2021,39(10):1882-1896.
JIANG Yu-jie, GUO Ting, WANG Shang-ke, et al. How to Achieve Breakthrough Innovation in Emerging Countries—A Study Based on the Comparative Analysis of V2X Patent Data between China and the US[J]. Studies in Science of Science, 2021, 39(10): 1882-1896.
- [12] 陈劲,吴欣桐.大国创新[M].北京:中国人民大学出版社,2021.
CHEN Jin, WU Xin-tong. Big country innovation[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2021.
- [13] RICHARD AL J. Radical innovation: how mature companies can outsmart upstarts[M]. Boston: Harvard Business School Press, 2000.
- [14] DOSI G. Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technical Change[J]. Research Policy, 1982, 11(3): 147-162.
- [15] EHRNBERG E. On the Definition and Measurement of Technological Discontinuities[J]. Technovation, 1995, 15(7): 437-452.
- [16] MCDERMOTT C M, O'CONNOR G C. Managing Radical Innovation: An Overview of Emergent Strategy Issues[J]. Journal of Product Innovation Management, 2002, 19(6): 424-438.
- [17] KASMIRE J, KORHONEN J M, NIKOLIC I. How Radical is a Radical Innovation? an Outline for a Computational Approach[J]. Energy Procedia, 2012, 20: 346-353.
- [18] DAVENPORT T H. Need Radical Innovation and Continuous Improvement? Integrate Process Reengineering and TQM[J]. Planning Review, 1993, 21(3): 6-12.
- [19] FORÉS B, CAMISÓN C. Does Incremental and Radical Innovation Performance Depend on Different Types of Knowledge Accumulation Capabilities and Organiza-

- tional Size? [J]. Journal of Business Research, 2016, 69(2): 831-848.
- [20] VERGANTI R. Design, Meanings, and Radical Innovation: A Metamodel and a Research Agenda[J]. Journal of Product Innovation Management, 2008, 25(5): 436-456.
- [21] STORY V, O'MALLEY L, HART S. Roles, Role Performance, and Radical Innovation Competences[J]. Industrial Marketing Management, 2011, 40(6): 952-966.
- [22] O'CONNOR G C, RICE M P. A Comprehensive Model of Uncertainty Associated with Radical Innovation[J]. Journal of Product Innovation Management, 2013, 30: 2-18.
- [23] SOOD A, TELLIS G J. Technological Evolution and Radical Innovation[J]. Journal of Marketing, 2005, 69(3): 152-168.
- [24] 张洪石, 陈劲. 突破性创新的组织模式研究[J]. 科学学研究, 2005, 23(4): 566-571.
ZHANG Hong-shi, CHEN Jin. The Study about Organizational Mode for Radical Innovation[J]. Studies in Science of Science, 2005, 23(4): 566-571.
- [25] 陈劲, 戴凌燕, 李良德. 突破性创新及其识别[J]. 科技管理研究, 2002, 22(5): 22-28.
CHEN Jin, DAI Ling-yan, LI Liang-de. Breakthrough Innovation and Its Identification[J]. Science and Technology Management Research, 2002, 22(5): 22-28.
- [26] 薛红志, 张玉利. 互补性资产与既有企业突破性创新关系的研究[J]. 科学学研究, 2007, 25(1): 178-183.
XUE Hong-zhi, ZHANG Yu-li. Study of Relationship between Complementary Assets and Incumbent Firms' Radical Innovation[J]. Studies in Science of Science, 2007, 25(1): 178-183.
- [27] 张金柱, 张晓林. 利用引用科学知识突变识别突破性创新[J]. 情报学报, 2014, 33(3): 259-266.
ZHANG Jin-zhu, ZHANG Xiao-lin. Identification of Radical Innovation Based on Mutation of Cited Scientific Knowledge[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2014, 33(3): 259-266.
- [28] 张金柱. 基于引用科学知识突变的突破性创新识别方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
ZHANG Jin-zhu. Research on Breakthrough Innovation Identification Method Based on Citing Scientific Knowledge Mutation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [29] 赵息, 李文亮. 知识特征与突破性创新的关系研究——基于企业社会资本异质性的调节作用[J]. 科学学研究, 2016, 34(1): 99-106.
ZHAO Xi, LI Wen-liang. Knowledge Attribute and Radical Innovation: The Moderating Effect of Heterogeneity Social Capital[J]. Studies in Science of Science, 2016, 34(1): 99-106.
- [30] 郭小超, 雷婧, 冯银虎, 等. 基于知识图谱的国际突破性创新理论研究综述[J]. 科学管理研究, 2020, 38(1): 20-26.
GUO Xiao-chao, LEI Jing, FENG Yin-hu, et al. Review of International Radical Innovation Based on the Knowledge Map[J]. Scientific Management Research, 2020, 38(1): 20-26.
- [31] ROSENMAN M A, GERO J S. Purpose and Function in Design: From the Socio-Cultural to the Techno-Physical[J]. Design Studies, 1998, 19(2): 161-186.
- [32] TROTT P. Innovation Management and New Product Development[M]. Essex: Pearson Education Limited, 2013.
- [33] CROSS N. Engineering Design Methods[M]. Sussex: John Wiley & Sons, 2000.
- [34] PAHL G, BEITZ W, FELDHOUSEN J, et al. Engineering Design[M]. Darmstadt: Springer Verlag, 2007.
- [35] ZHANG Q, DENIAUD I, CAILLAUD E, et al. Descriptive Model for Interpreting Innovative Design[C]// International Design Conference-Design 2012, Dubrovnik: HAL Science Ouverte, 2012.
- [36] 孙守迁, 赵东伟, 戚文谦. 人机融合创新设计[J]. 包装工程, 2021, 42(12): 7-15.
SUN Shou-qian, ZHAO Dong-wei, QI Wen-qian. Human-Machine Fusion and Innovative Design[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(12): 7-15.
- [37] 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. Source, Operating Mechanism, and Evaluation of Innovative Design[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(18): 60-70.
- [38] 邓卫斌, 王彤彤, 叶航. 基于参数化思维的产品创新设计方法[J]. 包装工程, 2022, 43(8): 76-84.
DENG Wei-bin, WANG Tong-tong, YE Hang. Product Innovation Design Method Based on Parametric Thought[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(8): 76-84.
- [39] 林丽, 李智美. 基于原型理论的产品造型风格创新设计方法研究[J]. 包装工程, 2022, 43(8): 42-49.
LIN Li, LI Zhi-mei. Innovative Design Method of Product Modeling Style Based on Prototype Theory[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(8): 42-49.
- [40] 檀润华, 曹国忠, 刘伟. 创新设计概念与方法[J]. 机械设计, 2019, 36(9): 1-6.
TAN Run-hua, CAO Guo-zhong, LIU Wei. Concepts and Methods of Innovative Design[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(9): 1-6.
- [41] DRUCKER P F. The Discipline of Innovation[J]. Harvard Business Review, 1985, 63(3): 67-72.
- [42] BARON R A. Opportunity Recognition as Pattern Recognition: How Entrepreneurs "Connect the Dots" to Identify New Business Opportunities[J]. Academy of Management Perspectives, 2006, 20(1): 104-119.
- [43] 魏丽坤. Kano 模型和服务质量差距模型比较研究[J]. 世界标准化与质量管理, 2006(9): 10-13.
WEI Li-kun. A Comparative Study on Kano Model and Gaps Model of Service Quality[J]. World Standardization & Quality Management, 2006(9): 10-13.

- [44] 檀润华. TRIZ 及应用技术创新过程与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
TAN Run-hua. TRIZ and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [45] 于菲, 刘芳, 檀润华, 等. TRIZ 辅助多层次裁剪方法集构建[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 156-164.
YU Fei, LIU Fang, TAN Run-hua, et al. Construction of Multi-Level Trimming Method Set Based on TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 156-164.
- [46] 刘芳, 江屏, 檀润华. 基于技术杂交的一类产品技术集成创新设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 123-132.
LIU Fang, JIANG Ping, TAN Run-hua. Product Integrated Innovation Based on the Technological Hybridization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21): 123-132.
- [47] 刘力萌, 檀润华, 刘伟, 等. 基于情景的模糊前端创新机会识别[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2021: 1-20. (2021-06-18) [2022-04-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210618.0946.010.html>.
LIU Li-meng, TAN Run-hua, LIU Wei, et al. Identification of Innovation Opportunities in Fuzzy Front End Based on Scenario[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021: 1-20. (2021-06-18)[2022-04-15]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210618.0946.010.html>.
- [48] KRUMNACK U, KAI K, SCHWERING A, et al. Analogies and Analogical Reasoning in Invention[M]. New York: Springer, 2013.
- [49] 陈英和, 赵笑梅. 类比问题解决的理论及研究[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2008(1): 50-56.
CHEN Ying-he, ZHAO Xiao-mei. Theoretical Issues in Analogical Problem Solution: A Survey[J]. Journal of Beijing Normal University (Social Sciences), 2008(1): 50-56.
- [50] WAREHAM T, EVANS P, VAN ROOIJ I. What does (and Doesn't) Make Analogical Problem Solving Easy? A Complexity-Theoretic Perspective[J]. The Journal of Problem Solving, 2011, 3(2): 30-71.
- [51] 檀润华, 张瑞红, 刘芳, 等. 基于 TRIZ 的二级类比概念设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(3): 328-333.
TAN Run-hua, ZHANG Rui-hong, LIU Fang, et al. Two Stages Analogy-Based Conceptual Design Based on TRIZ[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(3): 328-333.
- [52] LITVIN S, FEYGENSON N, FEYGENSON O. Advanced Function Approach[J]. Procedia Engineering, 2011(9): 92-102.
- [53] 檀润华. C-TRIZ 及应用——发明过程解决理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.
TAN Run-hua. C-TRIZ and its Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020.
- [54] 李志广. 基于功能和物理定律的概念设计研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
LI Zhi-guang. Study on Conceptual Design Based on Function and Physical Laws[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [55] MONTECCHI T, RUSSO D. FBOS: Function/Behaviour-Oriented Search[J]. Procedia Engineering, 2015, 131: 140-149.
- [56] TAN Run-hua. TRIZ and Applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [57] WANG Kang, TAN Run-hua, PENG Qing-jin, et al. Radical Innovation of Product Design Using an Effect Solving Method[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 151: 106970.
- [58] BARTINI R. Relations Between Physical Constants[J]. Progress in Physics, 2005, 1(3): 34-40.

责任编辑: 陈作