

国之重器如何实现复杂技术系统整体赶超*

——中国核电堆芯的纵向案例研究

许 晖¹ 卢一斌¹ 李 阳¹ 王 冶²



(1.南开大学商学院,天津 300071;
2.中国核工业集团有限公司,北京 100822)

内容提要:在我国国之重器的锻造征程中,核工业是为数不多在众多关键技术环节实现完全自主、绝对可控的产业之一。其中,以中国核电堆芯——177堆芯为代表的复杂技术系统在技术积累薄弱、自主创新能力缺失的艰难处境下,实现了从落后到引领的地位跃迁,走出了一条独具特色的技术突破之路。然而,学界尚未对此做出理论解释。本文基于对国之重器“华龙一号”的核心部件177堆芯研发历程的纵向剖析,探索了复杂技术系统的技术突破路径。研究发现:(1)国之重器复杂技术系统的整体突破路径具有显著的非线性与非连续性特征,历经“势能积聚—动能释放”两个过程。势能积聚表现为“技术机会识别—技术外力依附—自主技术积累”的漫长循环迭代过程,动能释放表现为“技术机会创造—技术外力脱离—引领性技术创造”的快速单向演进过程。(2)从技术轨道特征来看,自主技术轨道与外部技术轨道之间的互动关系历经从“依附”到“脱离”的转变,期间自主技术轨道与外部技术轨道之间的互动关系不断动态演化。(3)复杂技术系统通过“创新驱动要素转换—创新主导动力更替—技术体系重置”的内在机制实现由循环迭代向单向演进的技术轨道非连续性跃迁。本文形成的理论框架旨在为“国之重器”复杂技术系统技术突破以及由跟随者向领跑者的技术轨道跃迁提供理论借鉴。

关键词:国之重器 核电堆芯 复杂技术系统 技术轨道理论 技术突破

中图分类号:F273.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2025)01—0024—25

一、引言

关键领域的复杂技术系统事关国家命脉,对维护国家主权、支撑产业升级和国民经济发展具有重要战略意义(余江等,2019)^[1]。我国长期以来高度重视关键领域复杂技术系统的研发,早在1983年,国务院颁布《关于抓紧研制重大技术装备的决定》,旨在尽快追赶当时世界先进重大技术装备水平,发挥对经济建设的巨大促进作用(张国宝,2002)^[2]。进入21世纪后,世界

收稿日期:2024-05-13

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目“数智驱动下高科技企业场景式解决方案研究:理论模型、构建机制及市场响应性”(72272082);国家社会科学基金重大项目“智能制造关键核心技术国产替代战略与政策研究”(21&ZD132);国家自然科学基金面上项目“中国跨国企业复合式营销能力的理论模型与构建机制:基于从资源端到客户端的动态演化逻辑”(71972110)。

作者简介:许晖,女,教授,博士生导师,研究方向为国际企业管理、技术与服务创新,电子邮箱:susan_xuhui@126.com;卢一斌,男,博士研究生,研究方向是技术创新管理,电子邮箱:luyb@mail.nankai.edu.cn;李阳,男,博士研究生,研究方向为国际营销、技术创新管理,电子邮箱:nkulyang@163.com;王冶,男,中国核工业集团有限公司正高级工程师,研究方向为项目管理,电子邮箱:13911571830@139.com。通讯作者:卢一斌。

格局波谲云诡,我国先后出台多项政策,进一步强化对关键领域复杂技术系统的重视。经过近几十年的发展,我国已在许多重要领域取得重大突破。然而,由于复杂技术系统具有技术构成复杂、攻关难度巨大、技术壁垒极高等固有特点(Hobday, 1998)^[3],我国部分细分领域的复杂技术系统研发仍然举步维艰。值得关注的是,核电堆芯技术是我国为数不多在关键环节实现完全自主、绝对可控的领域之一。堆芯是核电站的“心脏”,铀 235 的核裂变链式反应就在此发生,堆芯技术是核工业技术体系中的核心部分,象征一个国家核电技术的最高水平,是一项典型的复杂技术系统(Zheng 等, 2016^[4];柳卸林和葛爽, 2023^[5])。因此,要想掌握先进核电技术,堆芯技术是无法绕开的门槛。由于核工业的极端特殊性,堆芯技术与国家能源安全、国防安全、外交话语权等密切相关,受到所有核强国的严格封锁(施海宁等, 2024)^[6],要想获取堆芯的关键核心技术,除了自主研发别无选择。历经 20 余年艰难探索,我国独立自主创造出国际领先的三代核电堆芯技术—177 堆芯这一代表性复杂技术系统。因此,凝练并总结出 177 堆芯的技术突破过程具有重要的理论价值。虽然管理学界已围绕重型燃气轮机(赵长轶等, 2023)^[7]、盾构机(欧阳桃花和曾德麟, 2021)^[8]、卫星导航系统(赵耀升等, 2021)^[9]等进行了深入研究,揭开了我国诸多领域国之重器技术获取、技术成长与追赶超越的实现过程,但 177 堆芯在技术突破路径方面表现出不同于其他研究对象的非线性与非连续性独特特征,为复杂技术系统领域提供了全新的研究范例。因此,打开 177 堆芯技术突破路径机制的“黑箱”具有重要意义。

现有文献围绕“复杂技术突破”话题已有一些探讨,其中以技术追赶(Kiamehr 等, 2015^[10]; Miao 等, 2018^[11])、二次创新(吴晓波, 1995^[12]; Wu 等, 2009^[13]; 彭新敏等, 2022^[14])等理论视角最具代表性。这些研究为本文提供了重要启发,已有理论体系对于解释阶段分明、技术路线明确、技术脉络清晰的复杂技术系统技术突破路径机制具有良好的适用性。然而,对于本文技术突破路径非线性、技术演进脉络非连续性的复杂技术系统来说,难以形成良好的解释力。另外,已有研究多从宏观或中观管理要素的维度解释复杂技术系统是如何实现技术突破的,缺乏微观视角下技术突破的细节性证据(许晖等, 2024)^[15]。而本文所关注的复杂技术系统不同管理要素之间繁杂交织,难以梳理并抽离出一条完整的管理维度的研究主线。因此,对于本文而言,难以从管理维度研究其技术突破路径机制。事实上,无论研发主体在管理维度上做出何种变化,其结果终将“殊途同归”地体现在微观技术的演进上。因此,聚焦于微观技术维度,关注复杂技术系统微观技术特征的动态演化,将能更有效地提炼出复杂技术系统技术突破的规律。然而,少有研究关注于此。

基于上述分析,技术轨道理论提供了新的视角。技术轨道是指由技术范式自身的原理所限定的技术进化轨迹(Dosi, 1982)^[16],技术轨道理论从技术演化与动态发展的角度有效解释了新旧技术交替(Khanagha 等, 2018)^[17]、突破性创新(陈傲和柳卸林, 2011)^[18]的路径规律等问题。现有文献利用技术轨道理论对技术锁定的破解(杨武等, 2023)^[19]、技术演进与扩散轨迹(Kash 和 Rycroft, 2002)^[20]、技术轨道跃迁(Lee 和 Lim, 2001)^[21]等问题开展了研究。因此,从技术轨道演化与动态发展的视角出发,本文将聚焦于技术演化维度来解释长历史周期内复杂技术系统的技术突破路径。然而,现有研究所关注的对象多为一般性企业或产业(郑素丽等, 2022)^[22],针对复杂技术系统技术突破的独有特征关注不足。与此同时,关于技术轨道理论的研究大多为宏观层面的诠释(Bergek 等, 2013)^[23],尚未对技术轨道的成长、突破、跃迁等过程的内在机理做出清晰的揭示。因此,有必要从技术轨道理论视角来解构复杂技术系统技术轨道成长、突破、跃迁的演化过程,以此清晰展现复杂技术系统的技术突破路径机制。这是对复杂技术系统技术突破研究视角的丰富,也是对技术轨道理论内在机理的深化。

综上所述,本文选取中国第三代核电“华龙一号”所采用的堆芯技术——177堆芯作为案例分析对象,聚焦于国之重器如何实现复杂技术系统的整体技术赶超这一研究问题,以微观技术细节的动态演化作为复杂技术系统技术突破路径机制的分析视角。具体而言,本文研究问题包括以下三个方面:第一,技术研发历程非线性、技术演化脉络非连续性的复杂技术系统技术突破路径是怎样的?第二,复杂技术系统如何通过非连续性技术轨道跃迁实现由引进消化吸收到自主创造的跨越?第三,复杂技术系统的技术突破过程中微观层面的技术细节是如何动态演化的?本文通过对177堆芯的纵向案例分析,旨在提炼出国之重器复杂技术系统的技术突破路径机制,以期为我国各个领域的复杂技术系统攻关提供理论参考。

二、理论回顾

1. 复杂技术系统及其技术突破

目前学术界对“复杂技术系统”并未形成完全一致的评判标准,已有文献将卫星导航系统(Yang, 2021)^[24]、燃气轮机(Majidpour, 2017)^[25]、通信系统(Li等, 2019)^[26]等都称为复杂技术系统。复杂技术系统的概念可追溯至20世纪90年代Hobday(1998)^[3]的研究,其认为具有高研发成本、大规模与技术密集等特征的大型部件、系统或工程可称为“大型复杂技术系统”。在此基础上,Kash和Rycroft(2002)^[20]进一步明确提出了“复杂技术系统”这一概念。综合管理学界研究观点可知,“复杂技术系统”是指以实现某项技术或特定功能为核心目标,为不同领域重大产品或工程提供关键技术支撑的技术系统。复杂技术系统应同时具备以下三方面特征:其一是复杂性,复杂技术系统由大量复杂基本部件与子系统构成,技术密集,研发周期长、研发难度大、技术壁垒高,无法做到大规模制造(许晖等, 2024^[15];龚天宇和袁健红, 2012^[27]);其二是网络性,从内部嵌套关系来看,各个子系统内部、子系统之间存在非线性模糊关联,构成一个复杂性技术网络(Prencipe, 2000)^[28];其三是不可分割性,各个子系统共同组成复杂技术系统的技术网络且不可分割,任何一个子系统的缺失都会导致整体功能的下降甚至失效(Baldwin和Hipple, 2011)^[29]。

现有文献对复杂技术系统技术突破问题的探讨主要集中于以下几个方面:第一,结构逻辑认为,在复杂技术系统突破过程中,具有技术嵌套与主体依赖的特征(Gholz等, 2018)^[30],所以其技术突破路径是基于复杂技术系统内部结构的突破,是从单点到多维、由低阶向高阶不断深入动态演进的过程(Chen等, 2021)^[31]。第二,技术逻辑以技术追赶、二次创新等理论最具代表性。基于技术追赶理论的研究认为,复杂技术系统被少数技术寡头垄断(Park, 2012)^[32],后发国家难以通过颠覆的方式实现快速技术突破(Majidpour, 2016)^[33]。因此,后发国家通过资源配置(Danneels, 2010)^[34]、生态构建(刘云等, 2023)^[35]、制度环境(Genin等, 2020)^[36]等机制来缩小与先发国家的技术差距,从而实现技术追赶乃至超越,并强调了技术追赶过程的动态性(Awate等, 2012)^[37]。基于二次创新理论的研究认为,全球技术转移的背景为后发国家有效利用外部技术提供了机会(Wu等, 2009)^[13]。无论是技术追赶还是二次创新,都强调从消化吸收到再创新的跨越过程(彭新敏等, 2022)^[14]。总体而言,技术逻辑强调技术突破过程的递进性、渐进性与连续性(Lee和Lim, 2001^[21]; Lee和Malerba, 2017^[38]),最终实现从“落后—追赶”到“创新—引领”的技术突破。第三,部分学者基于中国情境提出了举国体制逻辑,认为复杂技术系统的技术突破路径呈“国家规划—重大工程引领—‘政府+市场’合力”的技术突破模式(赵耀升等, 2021)^[9],国家规划与重大工程引领实现了顶层规划层面的任务拆解、跨系统协调与技术目标瞄准(Mei和Zhang, 2021)^[39],政府+市场合力实现了贯彻层面的资源聚集、组织协调与要素融合。总体来说,上述研究为复杂技术系统研究提供了重要理论借鉴,例如,遵循技术逻辑的研究解释了如何通过跟随战略实现技术起步(欧阳桃花和曾德麟,

2021)^[8];遵循结构逻辑和新型举国体制逻辑的研究解释了从技术引进向自主研发的路径转换过程(路风,2019)^[40]。

然而,进一步分析发现,已有理论仅能够在一定程度上解释本文核电堆芯在特定阶段的技术突破过程,无法刻画并解构出完整的技术突破路径,也难以对本文研究对象的独特特征形成精准的适配。具体来看:已有的技术突破理论体系均是基于特定的前提性情境所建构,对差异性研究情境或不同研究对象的解释力有待考证,特别是本文关注到了特殊领域具有独特特征的研究对象,因此需要探索新的理论体系。需要注意的是,已有研究无论是结构逻辑、技术逻辑还是举国体制逻辑,关于复杂技术系统技术突破路径的落脚点往往都是资源、组织、制度等管理维度。面对本文所探究的复杂技术系统来说,现有理论体系则难以清晰解构出其管理要素之间的相互作用机制;另一方面,已有研究多数遵循的仍是线性连续演化逻辑,虽然有研究注意到了技术突破路径的非连续性,但对于激发非连续性的内在机制解构不够深入。因此,有必要聚焦于微观技术维度,解构复杂技术系统在突破过程中的技术特征动态演化过程。

2. 技术轨道理论与复杂技术系统技术突破

技术轨道理论最初由 Dosi (1982)^[16]提出,是指由技术范式中所隐含的对技术变化方向做出强选择性取舍的技术演化路径(Teece,2008)^[41]。现有文献主要围绕以下话题对技术轨道理论展开探讨:一是技术轨道的形成与演化。技术轨道理论认为,产业内存在一系列沿着既定方向持续演化的技术轨道,形成特定的技术范式或路径依赖(Momeni 和 Rost,2016)^[42]。其中,在演化中逐渐占据优势的技术轨道通过持续自我强化,排斥并削弱其他并存技术轨道,继而成为主导技术轨道(Khanagha 等,2018)^[17]。二是技术轨道的新旧更替。技术的发展并非无穷无尽,固定范式下的技术轨道存在极限。一旦达到技术极限,旧的技术轨道可能由新范式下的技术轨道所取代(Dosi,1988)^[43],这为新旧技术轨道交替提供了机会。三是技术轨道跃迁。技术的进步是阶段性、非连续的,是从一个相对稳定的技术轨道跳转到另一个全新的技术轨道,这一非连续性跳跃称为技术轨道跃迁。因此,从这一视角来看,技术突破的过程就是打破技术均衡状态,从有序到无序、由平衡态到非平衡态的演变过程(Li 等,2019)^[44]。

现有文献从技术轨道跃迁的视角对复杂技术系统技术突破的路径机制做出了解释,主要聚焦于以下两个方面:其一,关于复杂技术系统技术轨道跃迁的外生机会。技术轨道跃迁机制的触发通常源于外部技术的突破式创新(Capponi 等,2022)^[45]、市场的技术需求变化(Suarez 等,2015)^[46]、社会经济环境演变(Suarez,2004)^[47]等外生机会窗口。嵌入原有情境的技术体系在不同市场间具有较大非对称性和缄默性(Adner 和 Zemsky,2006)^[48],这为后发经济体进行复杂技术系统技术突破提供了赶超的机会窗口(周江华等,2022)^[49]。只有打破技术轨道的连续性,创造出“分叉点”,才能拉动技术轨道向更高水平跃迁。其二,关于复杂技术系统技术轨道跃迁的内生动力。技术轨道跃迁机制得以实现需要依靠内生性基础性动力,包括渐进式技术积累(Nelson,2008)^[50]、知识专有(Miller 等,2007)^[51]、科学前沿进展(Saranga 等,2019)^[52]等。不同于普通技术突破,复杂技术系统不允许技术短板的存在,因此,复杂技术系统技术轨道具有“累积”和“演化”的特征(Suarez,2004)^[47],当复杂技术系统所有子系统与模块实现累积突破后,才能形成整体性、稳定性的技术轨道(张立超和刘怡君,2015)^[53]。

综上所述,现有研究围绕技术轨道理论的概念内涵,以及技术轨道的形成、演进及跃迁等重要问题进行了有益探索,并从技术轨道跃迁的视角认知并解释复杂技术系统技术突破问题。但现有研究仍存在如下理论缺口:首先,现有关于复杂技术系统技术轨道成长与演化的探讨多为产业发展早期情境。实际上,结合我国现实情况,更多需要探讨在产业发展成熟期我国自主复杂技术系统如何在全面落后情况的情境下实现“从0到1”以及“从1到N”的技术突破。其次,现有研究虽然

已经认识到技术轨道跃迁是内外部因素综合影响下的结果,但尚未深入探究因素之间的逻辑关系和因素间的具体作用机制。最后,已有研究虽然尝试从技术轨道理论视角解释复杂技术系统的技术突破路径机制,但尚未形成完整理论体系,对于复杂技术系统的技术轨道演化全过程及跃迁机制缺乏系统性解释。因此,有必要对技术轨道跃迁机制的“黑箱”进行解构,以清晰揭示复杂技术系统技术轨道非连续性跃迁的内在机制。

三、研究设计

1.方法选择

本文围绕“复杂技术系统如何实现技术整体赶超”这一研究问题,采用探索性单案例研究方法,原因如下:一是此类问题属于机制的范畴,本文旨在探讨我国如何在技术积累薄弱、自主创新能力缺失的情境下实现第三代核电堆芯的技术突破,以期刻画复杂技术系统技术轨道的动态演化,挖掘复杂技术系统技术突破的路径机制。这一研究问题具有探索性、非线性与归纳性特点,适合纵向单案例研究方法。二是复杂技术系统的技术突破包含多主体、多要素之间的相互影响以及多个演进过程,通过纵向视角的单案例分析,有助于通过揭示概念之间的互动关系与因果逻辑,以形成普适性的理论发现。

2.案例选择

按照理论抽样原则,遵循典型性和特殊性的要求,本文选择中核集团作为案例企业,以中核集团自主设计研制的177堆芯作为研究对象,原因如下:

首先,177堆芯涉及多个子系统与辅助系统,学科交叉特征显著,是一个极具代表性的复杂技术系统。堆芯布置牵一发而动全身,177堆芯技术研发任务涉及336个子系统、25个学科,先后参与研发的单位包括14家国际组织,75家国内高校、科研机构及设备制造企业。堆芯研发涉及179项技术攻关,是一项极其庞大的、不同管理要素之间繁交织、内部极其混沌复杂的攻关任务。堆芯布置的改变意味着核电站主系统和庞大的辅助系统均需围绕独创的177堆芯来进行重新设计、论证与试验验证。从技术维度来划分,177堆芯技术攻关主要包含理论设计领域、结构设计和关键设备研制、系统设计及安全性能提升、系统和设备可靠性试验验证四大维度,每个技术维度包含多个专项技术攻关(如图1所示),每个技术攻关专项内又细分多项课题。整个研制过程共编制技术报告2000余份,设计图纸6000多张,申请国内外专利700余项,技术之间的复杂嵌套耦合展现出典型的复杂技术系统特征。

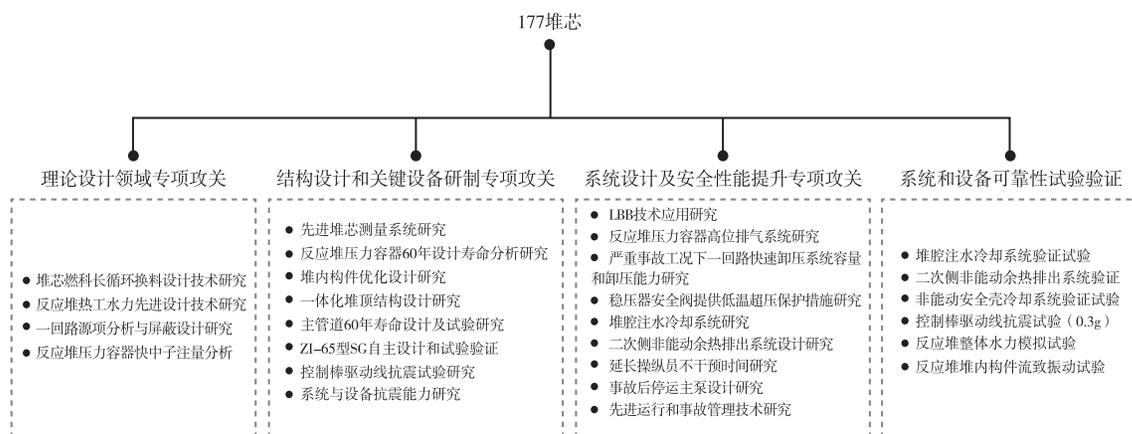


图1 177堆芯技术攻关主要内容

资料来源:作者整理

其次,177堆芯承载众多核电领域尖端技术,是我国超级工程及核工业领域的国之重器“华龙一号”核电的最核心部件,其研发成功代表我国核电技术已达国际领先水平,对中国核电走向世界意义重大。堆芯设计是所有核电强国的绝对核心技术,目前世界范围内运行的主流核电机组多使用157堆芯^①。177堆芯^②是“华龙一号”所独有的堆芯型号,也是“华龙一号”区别于其他核电技术的最显著特征。中国核电事业艰难起步于核潜艇陆上模式堆,受限于技术能力,当时我国自主研发的196堆芯^③功率只有30万千瓦。后续在“技贸结合、成套引进与自主研发相结合”的发展思路指导下,我国通过大亚湾核电站项目引进了国内首台当时世界先进的采用157堆芯的法国技术M310。通过主动与世界前沿技术接轨,历经技术模仿、消化吸收的过程,我国逐步构筑起堆芯的系列化设计能力。但堆芯若依附于人,自主核电就无从谈起。为摆脱对国外技术的依赖,我国决定独立自主研发核电堆芯,进而提出了177堆芯设计方案,拉开了我国第三代自主核电技术全面突破的序幕。历经20多年科研攻关,在国外重重封锁与限制下,我国突破一系列关键技术,全方位突破国外的专利围堵,成功实现了177堆芯由设计方案到工程应用的跨越。177堆芯创造出三代核电技术的“中国芯”,使我国成为继美、法、俄后又一个具有完全自主知识产权三代核电技术的国家。177堆芯整体性能达到国际先进水平,部分关键技术指标国际领先。

最后,177堆芯研发历程的典型特征契合本文发展理论的需要。177堆芯从设计方案到工程应用时间跨度达20余年,延续汇聚多条技术路线,历经多轮技术迭代升级,技术脉络交错杂糅,前期(20世纪90年代—2012年)是先后以法国M310、美国AP1000、法国EPR、俄罗斯VVER等技术为标杆进行学习模仿、消化吸收、自主化的漫长技术积累与循环迭代过程,后期(2012—2022年)是在前期积累的技术能力基础上进行独立自主的技术创造的前向突破过程。整体来看,177堆芯的技术演化历程具有明显的非线性与不连续性特征。与此同时,177堆芯的研发是我国尖端核心技术实现从依赖国外技术到脱离国外技术,最终创造独立自主的引领性技术跃迁的典型例证。我国核电发展初期,通过学习模仿与消化吸收法国157堆芯,自主化改造设计出121堆芯^④并实现工程应用,这是我国堆芯设计由学习模仿到形成自主化能力的里程碑式成就。后续随着对核电功率需求的不断扩大,我国又以157堆芯为基础翻版改进,由此掌握了百万千瓦级堆芯的设计能力,这是我国堆芯研发能力的再次跨越。此后,凭借深厚的技术积累,我国开启了堆芯自主研发之路并提出了177堆芯技术方案,核电型号历经持续迭代创新(迭代历程如图2所示),177堆芯技术不断成长、完善、进化。综上所述,177堆芯研发历程中技术的动态演进和跃迁等特征契合技术轨道理论的内涵。

科学的阶段划分能体现177堆芯研发历史周期内自主技术轨道的动态演化以及与外部技术轨道之间互动关系的动态演化,这也是纵向案例研究的基础。因此,借鉴物理学领域从势能积聚到动能释放的能量转化过程,综合考虑177堆芯研制过程中的关键事件节点,本文将整个177

① 157堆芯是一种反应堆堆芯型号,由157组燃料组件呈类“棋盘格”式排列组成,包含61束控制棒。是法国第二代核电技术M310所采用的堆芯,美国第三代核电技术AP1000同样采用了157组燃料组件的方案。

② 177堆芯由中国核动力研究设计院研发,是我国第三代先进核电“华龙一号”采用的堆芯。由177组燃料组件呈类“棋盘格”式排列,包含28束功率补偿棒、8束温度调节棒、33束停堆棒。相较于美、法等国核电常用的157堆芯,177堆芯在燃料组件装载逻辑、控制棒布置等方面进行了重新设计,在热工安全裕量、反应堆热功率、线功率密度、停堆裕度等多项性能指标上优势明显。

③ 196堆芯是我国用于模拟和验证核潜艇动力系统的陆地试验堆,我国将核潜艇堆芯应用于商用核电站的建设中,由此完全自主设计建造出国内第一座核电厂——秦山一期核电厂。虽然设计功率仅30万千瓦,但它是我国核工业军民融合的一次重大尝试,因此秦山一期核电厂又被誉为“国之荣光”。

④ 121堆芯是中国核动力研究设计院在法国核电M310的157堆芯基础上自主化改造而来,设计功率65万千瓦,由此开创了首个中国核电品牌CNP600,是我国自主化核电征程上的重要一步。

堆芯技术突破路径划分为“势能积聚”过程与“动能释放”过程。两个过程的关键性分界点出现在2012年,从宏观现实背景来说,2012年是中国政府调整部署未来核电发展战略的关键之年。受2011年日本福岛核事故的负面影响,我国紧急叫停了国内全部核电项目。2012年国务院常务会议通过了直接深刻影响我国未来十年的核电发展方向的文件:《核电安全规划(2011—2020年)》和《核电中长期发展规划(2011—2020年)》。在新的政策影响下,177堆芯研发前期通过模仿学习所形成的二代或二代+技术已不再适用。自此,由中核集团部署,核动力研究院牵头,开启了以完全自主、绝对可控为目标的三代核电技术独立自主的技术创造过程。具体而言,势能积聚过程(20世纪90年代—2012年)是为了克服自身技术积累薄弱、自主创新能力缺失的困难,积极引进国外先进技术,主动融入国外主导的技术轨道中。在对国外技术的学习模仿、消化吸收、改进翻版中,逐步完成自主化技术积累,构建起完整的堆芯技术体系。动能释放过程(2012—2022年)是为了实现核电技术独立自主主动创造技术机会,不仅脱离外部技术轨道的束缚,也是创造引领性技术体系的过程。

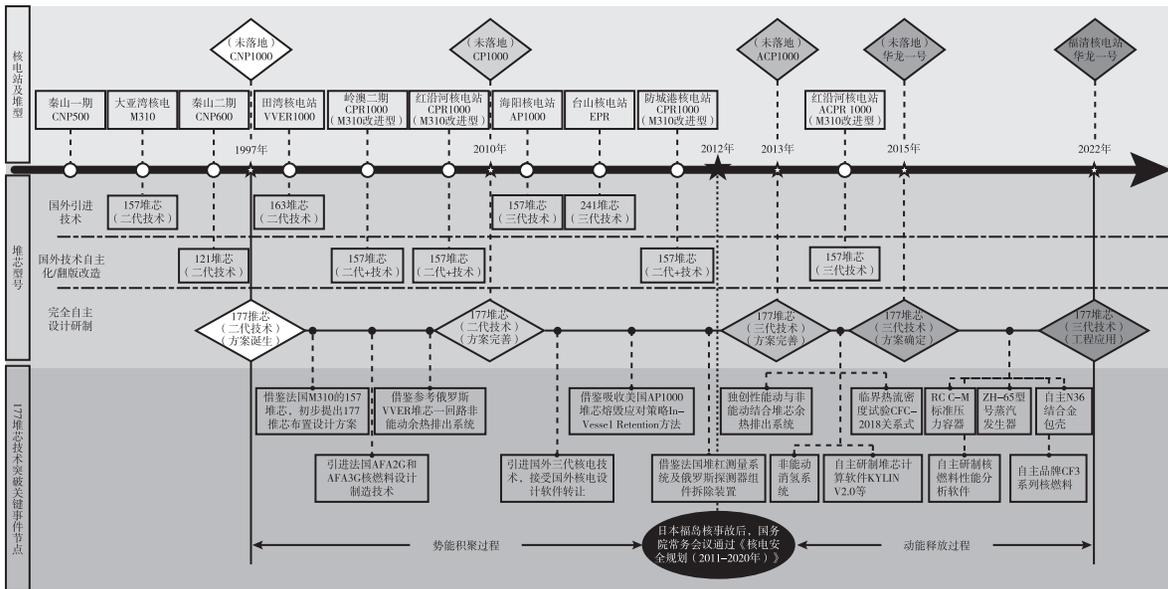


图2 中国核电产业发展脉络及177堆芯技术突破关键事件^①

资料来源:作者整理

3. 数据收集

本研究数据收集工作历时17个月,相关资料收集自2022年12月—2024年4月,分为以实地调研为主的一手资料和包括非公开资料与公开资料在内的二手资料。研究团队先后前往北京、成都、包头、深圳、天津等地,实地调研了中核集团以及下属研究院和子公司。同时,遵循证据“三角验证”原则,本研究除采用半结构化访谈之外,还采用多种来源的二手数据来提升稳健性,数据收集具体工作如下。

第一阶段为调研前准备。主要围绕中国核电发展史、“华龙一号”技术研发、核电堆芯设计研制原理等内容收集资料。同时,研究团队对中核集团、中国原子能科学研究院、中核北方核燃料元件有限公司、中国核动力研究设计院等拟调研单位及其关联单位进行资料收集,为后续正式调研储备知识。

^① 为保证图形可读性,图中所示核电站及堆型为部分代表性技术,并非国内采用的全部核电技术。同时,仅展示部分代表性177堆芯技术突破关键事件节点,并非全部技术突破事件。

第二阶段为现场调研与访谈。研究团队对中国原子能科学研究院、中核北方核燃料元件有限公司、中核集团经营管理部、中国核动力研究设计院等单位的相关管理人员与技术人员先后开展11轮半结构化访谈。访谈主题包括：中国核电发展现状及特点、“华龙一号”研发历程、核燃料元件研制和生产、177堆芯关键技术和技术难点、关键部件蒸汽发生器的研发历程、堆芯性能与质量检测等。考虑到涉核信息的保密性，数据处理过程中，在尊重受访者原意的前提下对内容进行脱敏处理。此外，研究团队先后前往成都、北京参观中国核动力科技馆、第十七届中国国际核工业展览会，围绕中国二代/三代核电型号研发、核电设备集成供货、核电产业链、供应链体系等话题，与国内外核领域从业人员进行非正式沟通交流，进一步丰富和补充本文资料。数据收集情况如表1所示。

表1 案例对象半结构化访谈及编码

数据来源	访谈对象	数据内容	访谈时长	编码
中国核动力研究设计院	设计所科技办	177堆芯关键技术和技术难点	160分钟	S ₁
	核电事业部	关键部件蒸汽发生器的研发历程	172分钟	S ₂
	设计所核电办	中国核电发展现状及特点、177堆芯设计技术特征	110分钟	S ₃
	安全分析部	堆芯性能与质量检测过程中遇到的困难和措施	140分钟	S ₄
	科技管理部	华龙一号及177堆芯研发历程	124分钟	S ₅
中核集团总部	经营管理部	中国核工业发展历史以及华龙一号自主创新历程	255分钟	S ₆
中核北方核燃料元件有限公司	生产运行部	AFA3G核燃料技术转让与消化吸收过程、核燃料元件生产与质量控制	150分钟	S ₇
中国原子能科学研究院	经营计划处	中国核工业发展历程、中国核电技术引进、消化吸收与自主创新过程	120分钟	S ₈
参与式观察	现场观察	参访中国核动力研究设计院展览厅、第十七届中国国际核工业展览会	2次/240分钟	D ₁

第三阶段为二手资料收集。该阶段与调研访谈工作同步开展并贯穿研究全过程，在半结构化访谈内容的基础上进行资料补充，包括从非公开渠道以及公开渠道获得的资料。非公开渠道资料来源于调研过程中受访者提供的集团公司非密内部文件、期刊、宣传手册等。公开渠道资料包括以下内容：①《国之重器：第三代先进核电华龙一号核心技术研发始末》《新火》《中国自主先进压水堆技术华龙一号》等专著。②纪录片、科普片等相关视频资料。③澎湃新闻、国资小新、中核集团微信公众号、人民网等关于我国核电技术的新闻报道。二手资料收集情况如表2所示。

表2 二手资料收集情况及编码

获取渠道	类别	数据内容	数量	编码
非公开渠道	内部资料	包括来源于中核集团与中国核动力研究设计院集团公司的非密内部文件、汇报PPT、内部期刊报纸、宣传手册等内部资料	46份	F ₁
公开渠道	期刊与专著	包括学术期刊《核动力工程》《原子能科学技术》，专著《国之重器：第三代先进核电华龙一号核心技术研发始末》《新火》《中国自主先进压水堆技术华龙一号》等	5份	F ₂
	新闻报道	包括中核集团与中国核动力研究设计院微信公众号、人民网、光明日报、澎湃新闻、央视网、国资小新等媒体相关报道	63篇	F ₃
	科普视频	央视纪录片《华龙一号》、凤凰网《华龙一号是如何诞生的？》、央视《开讲啦》节目：《国家名片这样铸造！》、中核集团纪录片《基石》、哔哩哔哩、微信视频号、微博等宣传科普视频	22个	F ₄

4. 数据分析

首先对收集的数据资料进行系统性概念化编码。本文采用一阶/二阶的结构化分析方法进行概念化编码(Gioia等,2013)^[54],一阶分析侧重访谈过程中受访者的真实语言表达,二阶分析使用以研究者为中心的概念、主题和维度,提炼聚合维度。基于所收集的原始数据,研究团队系统梳理中核集团自我国商用核电起步以来与177堆芯技术突破等技术创新行为相关的所有重要事件。对所梳理的重要事件进行编码,提炼形成了包含“引进先进技术”“前瞻性技术布局”“外部技术参照模仿”“外部技术交流合作”等在内的24个一阶概念。其次对其进行分类,抽象出具有理论内涵的二阶主题编码,例如,将“技术积累薄弱”“关键技术受制于人”归纳为“技术缺口聚焦”二阶主题,照此逻辑共抽象出12个二阶主题。最后,本文依据细分情境对具有相似性二阶主题进行理论聚合,形成理论维度,例如,将“技术标杆瞄准”“技术缺口聚焦”聚合到“技术机会识别”理论维度,照此逻辑,本文得到六个聚合维度。本文数据分析结构如图3所示。

为保证研究数据的信效度,首先,在研究团队三位教授指导下,通过初步资料收集和研讨形成调研计划和研究设计;其次,遵循“三角验证”原则,通过一系列调研和半结构化访谈收集原始数据,利用多种来源对本研究的证据链进行丰富和补充;最后,分小组进行数据分析和独立编码,在此期间不断补充数据以保证数据的完整性。在数据、构念与理论之间反复对照呼应,与现有文献进行反复对照,实现理论饱和。

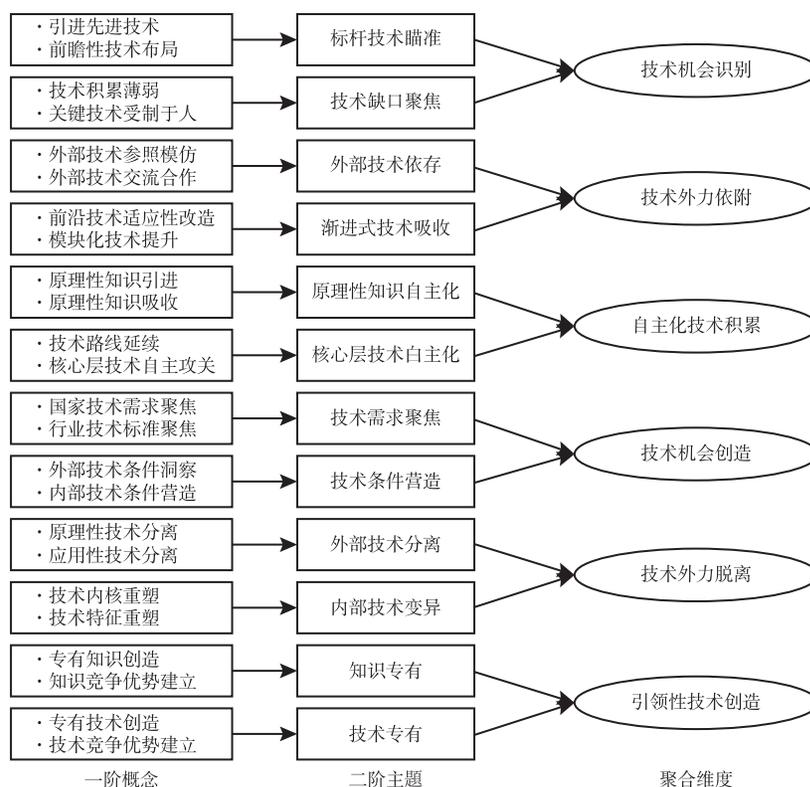


图3 数据分析结构

四、案例分析

177堆芯是我国具有完全自主知识产权的第三代百万千瓦级核电“华龙一号”的标志性技术创新,是我国核电创新发展的重大成果。纵向来看,177堆芯研发全过程历时20余年,研发周期漫长,且技术演进脉具有显著的非线性特征,既有前期循环往复、交织杂糅的漫长循环迭代的技术积累

过程,又有后期单向演进的快速突破过程。基于此,本部分拟分两个过程来解构177堆芯的技术突破路径机制:第一个过程旨在探讨中核集团循环迭代的堆芯研发技术体系积累与自主创新能力形成的过程。即起步阶段如何持续地通过技术机会识别以依附国外主导技术轨道,进而实现自主技术积累。第二个过程旨在探索177堆芯引领性技术体系独立自主的单向创造路径。即如何通过技术机会创造以脱离国外主导技术轨道,进而实现引领性技术创造。因此,对177堆芯技术突破路径机制的分析要从宏观视角把握整体过程,通过对案例分析凝练。本文基于上述两个过程将177堆芯技术突破路径提炼为“势能积聚—动能释放”。

1. 技术轨道势能积聚过程

20世纪80年是中国核电产业艰难起步时期,由于技术积累薄弱与技术创新能力缺失,我国核工业瞄准外部技术标杆以识别技术机会,这是我国堆芯研发能力快速成长的关键起点(典型例证如表3所示);通过主动引进国外技术,我国快速扩张核电产业规模,同时大量消化吸收外部技术。因此,技术外力依附是我国技术积累的关键(典型例证如表3所示);此外,我国通过引进来获取原理性知识,并基于此实现核心技术的自主化,进而积累形成自主化技术(典型例证如表3所示)。遵循上述过程,我国先后吸收当时世界上多种先进技术,持续完成了多轮技术迭代。上述循环迭代过程是我国核电发展早期完整性技术体系形成的重要过程,本文将上述过程总结为“势能积聚”,实现路径为“技术机会识别—技术外力依附—自主化技术积累”。从微观技术特征维度来看,本过程中,复杂技术系统的微观技术细节演化如图4所示。

表3 势能积聚过程的典型证据援引(部分)

理论维度	二阶编码	一阶编码	典型证据援引
技术机会识别	标杆技术瞄准	引进先进技术	在《核能发展技术政策要点》要求下,中国首次引进大型商用核电站,大亚湾核电站采用了法国的M310机型90万千瓦机组,堆芯为157组燃料组件(S ₁)
		前瞻性技术布局	没有长远目标是不能卓越的,核动力院在秦山二期堆芯设计时,就已把目光瞄到百万千瓦机组(F ₂)
	技术缺口聚焦	技术积累薄弱	对于二代+技术,我们没有现成的资料,仅有的一点资料也是只有结果没有过程,这就好比盲人瞎马,只是到目的地,没人知道怎么样达到这个目的(F ₁)
		关键技术受制于人	这种引进的模式行不通,钱没少花、技术上也没得到提高,设备人家愿意卖给我们,但是一些关键环节的核心数据国外公司是不会转让给我们的(S ₈)
技术外力依附	外部技术依存	外部技术参照模仿	中核集团与相关设计院签订《核电自主化依托项目国际招标技术准备工作任务及成果共享协议》,由核动力院和728院合作开展CNP1000初步设计,728院参照美国标准,核动力院采用法国标准(S ₃)
		外部技术交流合作	核动力院的技术专家以顾问和科技委专家的身份前往法国,参与法国公司技术转让的技术培训(S ₇)
	渐进式技术吸收	前沿技术适应性改造	秦山二期工程以大亚湾核电站M310技术为设计基准,将三回路改造为两回路,同时对反应堆堆芯、系统等进行了全面改造,形成了我们的国产化核电品牌CNP600(S ₃)
		模块化技术提升	按照中核集团的分工,由核二院和728院分别为总体院,承担三环路和四环路的设计、同时由核动力院作为分包院,承担反应堆、反应堆冷却剂系统、仪控系统的设计(S ₂)

续表 3

理论维度	二阶编码	一阶编码	典型证据援引
自主化技术积累	原理性知识自主化	原理性知识引进	21世纪初在三代核电技术评标中,核动力院坚持要求对方转让底层源代码和程序员手册,经过多轮谈判对方终于做出让步(S ₅)。
		原理性知识吸收	核动力院参考国外设计软件的简单节块法,设计出了在理论模型和计算方法上更为先进的核电厂堆芯核设计软件包 NPMFPS(S ₃)
	核心层技术自主化	技术路线延续	核动力院的很多中青年专家都曾参与过秦山二期的核燃料设计工作,后来又参与了177堆芯的研讨,如今已经成长为核动力院 CNP1000 研发的主要负责人(F ₂)
		核心层技术自主攻关	蒸汽发生器的研制过程中,最核心、最关键的环节就是两相流局部热工水力特性数据,国外公司绝对不会给我们。核动力院独立承担了 ZH-65 的四大设计验证试验,获得了金子般珍贵的一手数据(S ₂)

资料来源:作者整理

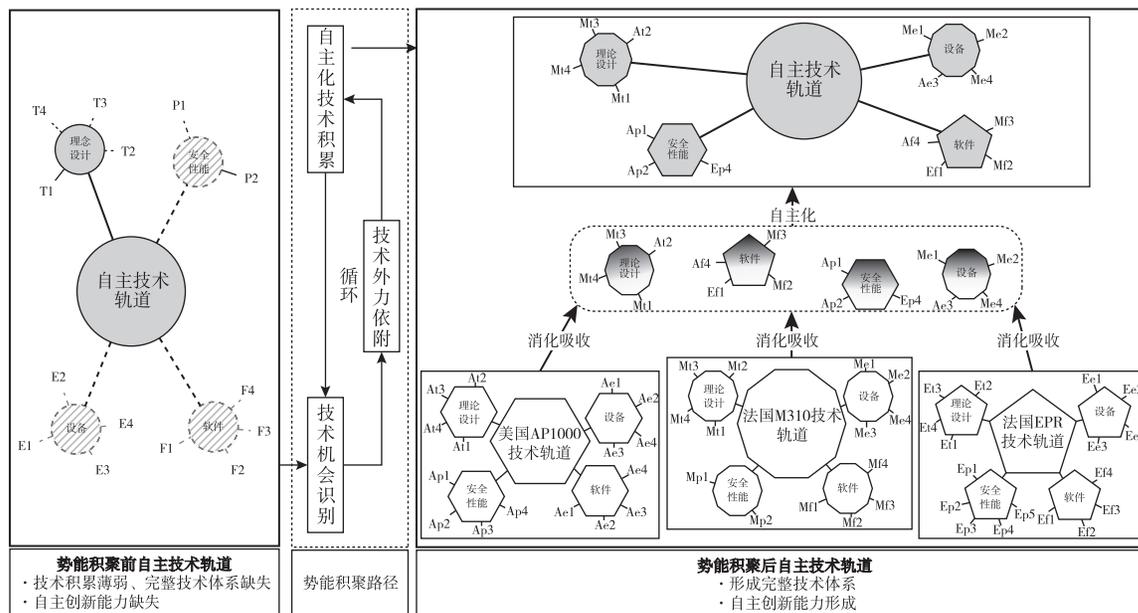


图 4 177堆芯复杂技术系统势能积聚过程的微观技术细节演化

注:由于核电堆芯技术系统构成复杂,为增强图形可读性,在兼顾事实的基础上上图中仅展示部分代表性堆芯技术子系统,并非全部技术构成;图中虚线图形表示尚缺失的子技术系统,实线图形表示不同核电型号的技术轨道,技术轨道的一级分枝表示核电堆芯的子技术系统,子技术系统之下的二级分枝表示具体的技术

(1)技术机会识别。技术机会包含了一系列技术进步的可能性(Robinson等,2019)^[55],通过探索最新技术动向,来把握最具价值的技术方向,并帮助企业突破技术障碍,捕捉技术发展新机会(许晖等,2023)^[56],主要表现为技术缺口聚焦与技术标杆瞄准。其中,技术缺口聚焦是发现自身技术短板的重要环节,基于对自身技术缺口的认知,推动瞄准行业标杆技术,以此为自身技术突破指明方向。

1)标杆技术瞄准。一是引进先进技术。中核集团早期引进先进技术的主要行为包括承接国外整套核电技术转让、学习国外核电站运营管理经验、购买国外关键设备等。中核集团下属的核动力院作为我国唯一的核反应堆工程研究、设计、试验、运行的研究设计院,是我国核电技术引进

的主要技术消化吸收承担单位。通过承接法国 M310 核电技术转让,核动力院快速学习法国 157 堆芯技术,并吸收转化为自身堆芯设计能力。对于技术壁垒高、专利封锁严等无法短时间内自主攻克的关键设备,核动力院选择从国外进口,包括反应堆压力容器、蒸汽发生器、核燃料技术等。正如核动力院设计所核电办技术专家所言,“培养中国自己的核心技术能力需要时间,要通过中外合作,引进并掌握先进技术,缩小与国际先进水平的差距,这是一套组合拳”(S₃)。二是前瞻性技术布局。主要指通过预判性战略思维来提前布局未来技术探索路径。中核集团前瞻性技术布局主要体现在对未来核电发展战略规划方面。在国家核能发展“三步走”战略以及“坚持核燃料闭式循环”的顶层方针指导下,我国兼顾“国产化”和“买容量”两条腿走路。在引进国外先进技术过程中,我国不仅引进了法国 M310 压水堆,还引进了加拿大的重水堆和俄罗斯的压水堆。在快速扩张核电容量的同时也广泛接触了世界不同技术路线的前沿核电技术,为我国核能发展三步走战略提前布局。正如中核集团经营管理部专家所言,“我国引进俄罗斯机组的主要目的并非其技术本身,而是为了在未来“三步走”战略的第二步上得到俄罗斯的帮助。至于我们的压水堆技术一直都‘师从’法国”(S₆)。

2) 技术缺口聚焦。一是技术积累薄弱。主要指在关键环节、关键设备、核心能力等方面普遍存在的短板问题。技术积累薄弱主要表现在制造能力不足、堆芯设计经验空白、关键技术环节不可控等方面。在核电装备制造方面,国内的核电装备制造业尚处于萌芽阶段,许多堆芯配套关键设备制造工艺不达标。例如,我国引进的法国 157 堆芯满功率为 98.4 万千瓦,然而国内只能制造支持 65 万千瓦功率的一回路设备,中核集团被迫将 157 堆芯功率降低至 65 万千瓦使用。在堆芯自主设计方面,中核集团仅有核潜艇堆芯的设计经验,从未设计过大型商用核电堆芯。关键技术环节方面,涉及核电站的设计、制造、建设、运营等环节,我国均高度依赖国外。正如核动力院设计所核电办技术专家所言,“由于我们的核电技术积累实在薄弱,大亚湾核电站是一个交钥匙工程,法方设计、建造、采购设备、安装调试,一切都完成后中方接过来只管运营就可以了”(S₃)。此外,核电关键技术受制于人。这主要由于技术壁垒、专利保护等原因,自身在诸多环节受到限制。二是关键技术受制于人的具体表现为核心零部件被“卡脖子”。堆芯相关装备的关键技术大多被国外核电寡头严格控制,国外公司通常会利用这一技术“剪刀差”收割高额利润。例如在堆芯控制棒驱动机构的研制中,国内企业无法制造出满足要求的钩爪、驱动杆等关键零部件,只能从掌握核心技术的少数几家外国公司手中进口。仅用于购买几个关键零部件的费用就占到了整套控制棒驱动机构造价的 40%。正如核动力院设计所科技办技术人员所言:“大家辛辛苦苦进行的技术方案设计,由于制造能力跟不上,不仅让外国把大部分钱赚走了,还要受制于人”(S₁)。

(2) 技术外力依附。拥有成熟技术体系的外部技术力量为后发者提供了依靠模仿、有效吸收、应用改造等借力途径。因此,通过技术外力依附有助于后发技术早期阶段快速实现技术积累(Lee 和 Malerba, 2017)^[38],技术外力依附主要表现为外部技术依存与渐进式技术积累。其中,外部技术依存旨在融入世界主流技术领域,基于对外部前沿技术的依存,实现渐进式技术积累。

1) 外部技术依存。一是外部技术参照模仿。中核集团的外部技术参照模仿机制主要表现在国外技术逆向研发、技术标准参照等方面。中核集团以国外先进核电技术为目标进行逆向研发和深度解构,获取技术细节,为自主堆芯设计积累经验并提供理论参考。以堆芯内部辐照监督管的研发过程为例,由于缺乏系统性的辐照监测技术体系,研发团队以当时世界上最先进的美国西屋公司技术为参照,梳理出了亟待攻关的 14 项研制技术。半槽壳是辐照监测的关键零部件,其内外部的 R 角成型工艺要求极为苛刻,课题组依照西屋公司所设置的技术指标要求,制定出工艺方案。正如中核集团经营管理部专家所言,“我国模仿、借鉴国内外核电设计经验,并开展了大量研究和试验验证工作,开创了我国首个具有自主知识产权的核电品牌 CNP600,这证明以我为主、中外合

作的理念是正确的”(S₀)。二是外部技术交流合作,主要指与不同企业、国家开展交流与合作,通过技术资源共享与联合等方式促进自身技术水平快速提升。中核集团的外部技术交流合作表现在联合技术攻关、人才培养、科研项目合作等方面。中核集团与法国在核物理、热工水力学、材料科学等多领域进行了深入技术合作,与此同时,中核集团组织核动力院派遣专家团队前往法国学习堆芯设计技术,法国的核电巨头如阿海珉集团和法国电力公司为中国提供了大量专业技术支持和人员培训服务。此外,中国与法国在反应堆热工水力、堆芯严重事故等领域成立了多个协作实验室。正如中核集团经营管理部专家所言,“我们的团队通过大量的经费投入,在全世界范围内学习经验,联合了国外包括法国、美国等十几家国际组织机构”(S₀)。

2)渐进式技术积累。一是前沿技术适应性改造,指结合自身既有技术能力与需求等因素,对前沿技术进行有选择性地改造,使之融入自身技术体系。中核集团的前沿技术适应性改造主要通过拼凑重组、翻版改进等方式实现。一方面,中核集团将来自不同主体的优势技术进行提取与融合,同时通过翻版、改进的方式对引进的技术进行边际创新与适应性调整,使之满足自身技术需求。例如,由中核集团部署,并由核动力院承接,顺应我国对百万千瓦核电站的需求,对法国 M310 的 157 堆芯进行强化升级,做出了 15 项适应性改造。正如中核集团纪录片《基石》中所提到的,“我们在岭澳二期建设中遵循‘翻版加改进’的设计原则,对买自国外的技术消化吸收,增加国产化设备比例和自主化设计,通过这种方式我们也拥有了百万千瓦核电机组”(F₄)。二是模块化技术提升。指将技术攻关任务进行解析,分模块、分步骤突破。我国堆芯研发表现为“设计—制造—软件”的分模块提升过程。我国通过前期的引进、模仿与改造已掌握堆芯系列化设计原则,并在此基础上自主化设计出 121 堆芯。我国以核电站设计项目为依托,逐步带动了我国核电装备制造体系成长完善。此外,由于堆芯设计软件的开发需要深厚的实际工程运营经验,中核集团通过参考国外转让的软件中的低版本源代码,联合多家科研单位逐步完善设计软件的功能包,进而掌握了软件开发能力。正如核动力院科技管理部技术人员所述,“从秦山二期到岭澳二期的发展历程来看,我国核电技术是以设计为核心,联动设备制造和软件开发,来逐步攻克各个环节的关键技术难点,实现自主可控的过程”(S₅)。

(3)自主化技术积累。根据技术轨道理论,顺延现有技术轨道的持续性技术吸收与积累,为技术创新和扩散积累了内生性基础动力(杨武等,2023)^[19]。自主化技术积累主要通过原理性知识自主化与核心层技术自主化来实现,其中,将外部原理性知识吸收与固化,融入自身知识体系中,由此实现原理性知识自主化。同时,复杂技术系统的攻关历程具有长周期性特征,通过持续深入探索,在核心技术层实现由外部依赖到自主化的跨越。

1)原理性知识自主化。一是原理性知识引进。主要指通过外部引进的方式获取技术背后的深层机理等底层知识,中核集团的原理性知识引进主要集中于设计原理、理论参数等方面。为了摆脱翻版改造的低级创新行为,在技术引进谈判时要求对方同时转让设计图纸以及设备接口、焊缝、管道结构等关键环节的基础参数和设计原则。同时,核动力院牵头负责要求对方转让设计软件的底层代码,计算公式等原理性知识,对关键设备自主设计、自主试验验证能力的形成起到了关键性作用。正如核动力院核电事业部技术专家所言,“三代核电技术引进时,我们要求西屋的 AP1000、法国的 EPR 和俄罗斯的 VVER 转让设计软件源代码和程序员手册这类重要基础文件”(S₂)。二是原理性知识吸收。中核集团的原理性知识吸收主要表现为对技术底层的理论模型及参数从接触到理解再到运用新知识的动态过程。例如,在蒸汽发生器研制中,由核动力院负责,从设计图纸入手探索关键结构汽水分离装置的流道螺旋界面的设计数学模型,以此摸索出影响干蒸汽的湿度的最佳结构精度。正如核动力院核电事业部技术专家所言,“外国公司把最基础的设计图纸、源代码等技术转让给了我们,我们是为了吸收他背后的数学模型,在参考别人的基础上进行改

进,进而保障安全”(S₂)。

2)核心层技术自主化。一是技术路线延续。主要指以长期技术目标为指引,通过持续的研发活动,不断推进自主技术演进发展。中核集团的自主技术延续主要表现为技术目标延续和技术发展路线延续,中核集团在核电技术探索的历程中始终以法国技术为主要学习目标并延续法国 157 堆芯技术路线,这是我国堆芯设计能力与技术体系得以持续积累并不断深入的原因之一。同时,我国堆芯研发虽历经改进与翻版阶段,但始终以完全自主知识产权为目标,核工业几代科研人员延续独立自主的技术发展道路。正如核动力院设计所科技办技术人员所言,“我们始终坚持发展自主核电技术,二十多年时间里,我们的品牌型号不断迭代创新,这背后反映的是中国核电人一代接一代不断的努力”(S₁)。二是核心层技术自主攻关。核心层技术指技术体系中最重要部分,核心层技术自主攻关是打破外部依赖,提高技术独立自主能力的关键。堆芯的核心层技术包括设计软件、结构设计、理论设计等部分,中核集团通过底层知识获取与吸收,自主编制了完整的堆芯设计软件,从源头上实现了堆芯及关键技术知识产权的自主掌握;中核集团摒弃翻版改进的思路,彻底重构堆芯布置逻辑,提出了全新的 177 堆芯结构;来自核动力院的技术团队经过精细的理论论证,将 177 堆芯设计方案细化,从理论设计层面证明了 177 组燃料组件堆芯设计的工程可行性。正如中核集团经营管理部专家所言,“重新设计堆芯就像给核电站换一个心脏,是绝对核心的技术。自主设计的 177 堆芯技术方案标志着我们也拥有了和 157 堆芯对等的核电堆芯”(S₆)”。

2. 技术轨道动能释放过程

在新的核电发展阶段,中核集团聚焦国家技术新需求与行业技术标准,主动创造技术机会(典型例证如表 4 所示)。基于此,中核集团逐步将外部技术分离出自身技术体系,同时重塑自身技术内核与技术特征以脱离外部技术轨道(典型例证如表 4 所示)。与此同时,通过专有知识与专有技术创造,剥离出旧的技术体系,创造全新的引领性技术体系(典型例证如表 4 所示)。本文将上述过程总结为“动能释放”,路径表现为“技术机会创造—技术外力脱离—引领性技术创造”,从微观技术特征维度来看,本过程内复杂技术系统的微观技术细节演化过程如图 5 所示。

表 4 动能释放过程的典型证据援引(部分)

理论维度	二阶编码	一阶编码	典型证据援引
技术机会创造	技术需求聚焦	国家技术需求聚焦	福岛核事故之后,国务院讨论通过《核电中长期发展规划(2011-2020年)》,规定以后的核电技术要进行技术升级,新建的核电站都必须符合三代安全标准,按照全球最高安全要求建设核电项目(S ₇)
		行业技术标准聚焦	我们把国际上流行的三代核电技术特征全都纳入未来研发的参考标准。与国外三代核电技术对标发现,我们确实有不少技术需要提高(S ₁)
	技术条件营造	外部技术条件洞察	AP1000 引进消化吸收与工程建设正如火如荼,大有一统天下的可能,留给 ACP1000 的时间窗口很短。同时,想要从 AP1000 中分一杯羹希望不大,唯一的出路就是把自己的 ACP1000 搞出来(F ₂)
		内部技术条件营造	中核集团态度很明确,集团发布《中核集团公司重点科技专项“三代核电技术”研究任务书》,依托已有技术 CP1000 和我国第三代核动力研发平台,支持我们继续自主研发三代核电技术(S ₁)
技术外力脱离	外部技术分离	原理性技术分离	我们自己设计的设备与现有的都不一样,如果沿用别人的标准去认证,安全审查部门根本不会认。我们只能自己编制分析软件,做实验得到自己的数据,再制定属于我们自己的技术标准(S ₂)
		应用性技术分离	核动力院成立了多达 20 个重点课题攻关组,对一系列关键设备开展自主攻关,蒸汽发生器、燃料组件、控制棒驱动机构等部件都实现了自主化,打破了对美、法等国的依赖(F ₂)

续表 4

理论 维度	二阶 编码	一阶 编码	典型证据援引
技术外力脱离	内部技术变异	技术内核重塑	堆芯重新布置相当于对核电站进行基因重组,在燃料组件、控制棒组件的布置逻辑、燃料组件装载、固体可燃毒物布置等方面都对 177 堆芯进行了重新设计(F ₄)
		技术特征重塑	压力容器的热工水力实验,国外普遍依照的是缩比试验,我们认为这种方法可能存在误差,为了使试验结果更有说服力,我们摒弃了缩比试验的技术思路,首次探索出了比例实验方法(S ₄)
引领性 技术 创造	知识 专有	专有知识创造	177 堆芯的自主知识产权覆盖设计、设备、建造、运行、维护等领域,并已自主开发了专用软件,形成了完整的知识产权体系,在国内和出口目标国均不存在侵犯他人知识产权和违反有关技术引进协议的风险(S ₃)
		知识竞争优势建立	177 堆芯的研发基于我国第三代核动力研发平台,建立了系统化三代核电知识体系,覆盖了设计、设备、试验、燃料、软件等关键核心领域,使我国实现了从核电大国向核电强国的跨越(D ₁)
	技术 专有	专有技术创造	世界范围内三代压水堆只有三条路线,美国的 AP1000、法国的 EPR、俄罗斯的 AES-2006,现在中国通过自主探索创造出了第四条路,采用 177 堆芯的华龙一号是一条“争气龙”(F ₃)
		技术竞争优势建立	177 堆芯全面满足国际最高安全标准 URD 和 EUR,达到了国际三代核电技术的先进水平,在多项性能指标上实现国际领先,总体安全水平超越了世界现有核电机组的水平(S ₄)

资料来源:作者整理

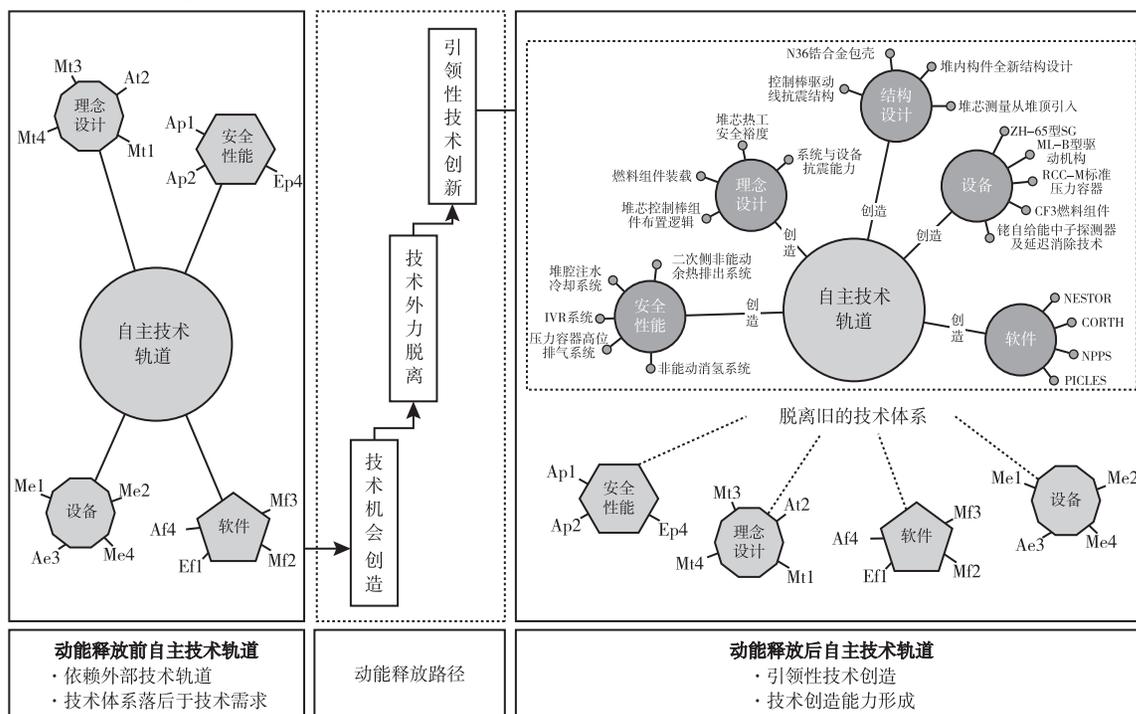


图 5 177 堆芯复杂技术系统动能释放过程的微观技术细节演化^①

① 由于核电堆芯技术系统构成复杂,为增强图形可读性,在兼顾事实的基础上图中展示部分代表性堆芯技术子系统,并非全部技术构成。

(1)技术机会创造。复杂技术系统的技术突破是一个持续性过程,技术主体会主动更新战略,基于新形势创造新的技术机会(张青和吴玉翔,2023)^[57]。相比于技术机会识别,技术机会创造更强调创新者的能动性与社会互动性。结合本文案例特点,本案例中的技术机会创造主要表现为技术需求聚焦与技术条件营造。

1)技术需求聚焦。一是国家技术需求聚焦。通过聚焦国家对科学技术的战略需求,动态调整自身技术攻关目标与导向,以精准响应国家技术需要。受日本福岛地震引发的堆芯放射性物质泄漏核事故的影响,中国政府紧急叫停国内已开工的核电项目,对此后的核电项目提出了更严格的要求。中核集团聚焦国家对未来核电产业发展的战略规划,准确把握未来核电的新技术特征,按照国家对核电的技术需求来重新规划 177 堆芯研发方向,以全球最高安全要求和最严格标准开展 177 堆芯研发。正如核动力院设计所科技办技术人员所言,“福岛核事故后,中核集团紧密结合国家核电发展新要求,组织专家重新论证,认为此时的 177 堆芯和国家所要求的‘全球最高安全标准’还存在差距,于是我们果断转入了新目标的研发工作”(S₁)。二是行业技术标准聚焦。主要指在研发过程中,对标行业技术标准,以此规划自身各方面技术参数与设计原则,确保自身技术的合法性和可靠性。中核集团主要通过参照国外三代核电技术标准来重新拟定 177 堆芯的技术标准。参照美国 AP1000 和法国 EPR 等国际先进三代核电,围绕堆芯抗震等级、核安全和防范严重事故能力、事故工况下堆芯安全性等维度列出相关的安全参考标准。并组织专家团队对比 177 堆芯与国外三代核电安全标准上的差距,补齐差距项,保证 177 堆芯的各项安全性指标均不低于国际三代核电标准。正如核动力院科技管理部技术人员所言,“我们把美、法、俄、日、韩等核电强国的核安全技术标准全部找来,与我们的技术逐条对照,所有低于国外标准的地方,都是我们需要改进之处”(S₅)。

2)技术条件营造。一是外部技术条件洞察。中核集团外部技术条件洞察主要表现为对国内外技术竞争态势的洞察。一方面,福岛核事故后的 177 堆芯仍属于“二代+”技术,不符合国家的最新要求。而同一时间内,于 2006 年引进的美国 AP1000 三代核电此刻已经开工在建,负责 177 堆芯研发的核动力院察觉到我国未来核电市场很可能被 AP1000 抢占。另一方面,核动力院虽然在 2006 年就参与到 AP1000 的技转中,但美国对关键技术细节严格保密,无法对其有效消化吸收。基于上述几方面外部技术条件的洞察,核动力院果断决定自主攻关,将 177 堆芯由“二代+”升级为三代技术。正如核动力院设计所核电办所言,“我们必须要在 AP1000 建成之前把 177 堆芯升级为三代技术,现在留给我们的时间窗口很短,而且必须要满足国家层面最高安全标准的要求”(S₃)。二是内部技术条件营造。核动力院通过获取中核集团政策支持、组织重点攻关课题、供应商技术能力培育等方式营造技术研发条件。核动力院向中核集团总部提交项目建议书,提出了 177 堆芯向三代技术升级的攻关方向。得到了中核集团政策支持后,核动力院随即开展“三代核电反应堆及一回路系统研制”项目攻关。核动力院独立申报并承担 18 项重点课题。中核集团统筹、核动力院牵头承担链主责任,扶持国内核电装备供应商,使我国核电装备制造能力实现跨越式发展,许多核电关键设备如蒸汽发生器、压力容器实现了自主化制造。正如中国原子能科学研究院经营计划处专家所言,“当时中核集团领导全力支持核动力院 177 堆芯研发,集团把核电站运营收益拿出来支持核动力院的研究,并定下了严格的目标”(S₆)。

(2)技术外力脱离。技术外力脱离主要表现为外部技术分离与内部技术变异。其中,外部技术分离旨在克服由于长期借助外部技术而形成的路径依赖,打破原有旧的技术发展方式。而技术变异则是以生物进化机制隐喻技术的演化(Ziman, 2000)^[58]。基于沿技术范式所确定的技术轨道完成技术发展的“遗传”过程,在环境作用下通过技术“蓝图”或“特征”的改变实现技术进化,从而形成突破式技术创新的技术变异。

1)外部技术分离。一是原理性技术分离。计算机软件属于堆芯研发的原理性技术,堆芯设计与试验验证过程中,任何一个环节应用到含国外专利的计算机软件,最终设计出的堆芯都不算完全自主知识产权。为了突破国外专利的重重围堵,中核集团通过“干中学”式摸索反复试错迭代,逐项攻克堆芯计算机软件底层代码中的理论模型、计算公式、数值计算、模拟计算等环节。通过堆芯计算软件的自主开发,177堆芯从原理性技术层面实现与外部技术的分离。正如核动力院核电事业部专家所言,“软件专利是国外限制我们的重要手段,我们最初购买国外的软件,后来通过摸索实现了自主化。解决了know how的问题之后,法国人再也没办法找我们的麻烦”(S₂)。二是应用性技术分离。实现堆芯各项功能的成熟技术路线已经被国外设置重重专利障碍,采用现有成熟的技术路线就必然无法绕开国外专利,自主可控也就无从谈起。中核集团攻关关键技术路径,在技术路径上的关键环节分离与国外专利的关联。以177堆芯燃料的自主化为例,阻碍燃料自主化的最大障碍是燃料棒包壳管材料锆合金的专利限制。为了摆脱国外的锆合金专利限制,中核集团从最基本的成分优选开始,历经成分、性能、组织、工艺等研究,自主研制出N36型锆合金。攻克锆合金这一关键节点后,177堆芯燃料自主化快速得以实现。正如中核北方生产运行部专家所言,“对国外技术改进再多,知识产权始终是国外的。而我们自主研发的新型材料,真正突破了国外知识产权包围,是我们实现独立自主的坚实保障”(S₇)。

2)内部技术变异。一是技术内核重塑。177堆芯技术内核重塑体现在设计理念、基础架构等方面的革新。中核集团摒弃了能动安全系统设计理念,全面平衡贯彻了核安全纵深防御原则和设计可靠性原则,创新性采用能动+非能动的安全设计理念,这是全球压水堆核电技术发展历程中的重大革新。中核集团对堆芯控制棒组件的布置逻辑进行了基础架构重置,法国的157堆芯控制棒有61束,其中28束功率补偿棒、8束温度调节棒和25束停堆棒。中核集团将177堆芯控制棒组件中停堆棒增加8束,重新计算停堆裕度,重置停堆棒在堆芯内区的编组方式,大幅提高了停堆裕度。正如中核集团内部文章所言,“我国核电最初‘师从’法国,在177堆芯持续自主创新的过程中,我们不断强化自主基因,形成了多项重大技术革新”(F₁)。二是技术特征重塑。主要指通过参数重置、技术路线重大升级等方式实现技术本身性能指标或功能特性的重大改变,177堆芯的技术特征重塑主要表现在极端标准下的性能表现方面。在非能动堆芯冷却系统的试验验证过程中,为177堆芯设置了远超行业公认标准的测试标准,确保了在极端的性能需求和严苛的外部工况下,177堆芯各项关键性能表现依然可靠。正如核动力院安全分析部技术人员所言,“为了确保177堆芯各项性能绝对可靠,我们很多工作没有完全遵照国外的标准,我们做了全世界最全的试验库数据,远远超过了国际上对第三代核电站所提出的概率安全指标”(S₄)。

(3)引领性技术创造。引领性技术创造主要表现为知识专有和技术专有,其中,知识专有旨在通过在自身技术轨道上建立知识专有,以此在不同技术轨道之间的竞争中形成引领性优势。通过围绕专有知识的技术创造,持续横向开拓技术宽度、纵向探索技术深度。基于上述路径实现引领性技术创造,脱离原有旧的技术体系,创造引领性技术体系。

1)知识专有。一是专有知识创造。主要指从基础理论、基本原理出发创造出难以复制、难以模仿的知识资产。中核集团通过基础学科突破、多源知识融合等方式创造出专有知识。从核物理、热力学、材料等基础学科入手,创造出177堆芯所独有的材料、结构、工艺等环节的专有知识。与此同时,中核集团将来自不同源知识进行匹配融合,通过拓展知识广度,挖掘知识深度来创造全新的专有知识。正如核动力院专家的汇报材料所述,“由于设计理念不同,177堆芯研发无法参照行业技术手册,核动力院围绕177堆芯量身打造出一套知识和理论体系,仅此一家,别无分号”(F₁)。二是知识竞争优势建立。指在掌握专有知识的基础上,通过知识管理、转化与应用等机制形成竞争优势。中核集团独创的177堆芯的知识竞争优势建立于知识定位、知识体系耦合等过程。

中核集团横向对标与美、法等国三代核电相同维度上的知识模块特征,以此来确定自身知识在全行业中所处的竞争位势。再通过自身不同维度知识模块之间的相互协调耦合,建立比较优势。另一方面,通过知识模块之间的最优匹配,177堆芯建立起在堆芯核设计、热工水力设计、堆内构件结构设计等方面均具备领先优势的知识体系。正如核动力院设计所核电办技术人员所言,“整个177堆芯研发过程伴随大量的知识创造,建立了完整、协调的先进知识体系,实现了各项理论创新的完美融合,这是保障华龙一号各项性能指标国际先进甚至领先的基础”(S₃)。

2)技术专有。一是专有技术创造。中核集团的专有技术创造产生于专有知识固化应用、多维技术聚合的过程。中核集团将不同技术攻关过程中所产生的零散化专有知识进行系统性整合,同时将项目团队研发人员的隐性知识(例如经验)输出为技术手册等具象内容,应用于新的技术创造中。此外,中核集团横向对标全球同代核电技术,通过识别和筛选,将各维度的技术高效纵向集成和聚合,形成颠覆现有技术系统性能或特征的专有技术。正如核动力院科技管理部技术人员所言,“‘华龙一号’所使用的‘中国芯’在结构设计、性能验证、软件设计、关键材料、制造技术等方面连续实现技术创造,这些技术正是‘华龙一号’区别于其他技术的地方”(S₅)。二是技术竞争优势建立。中核集团的技术竞争优势建立主要表现在引领技术标杆、技术特征颠覆、构建创新生态等方面。177堆芯在安全性方面取得极限性突破,在部分关键性能指标上的表现超越了全球极限性能,成为第三代核电的新标杆。横向对比来看,若把法国技术特征比作一条具备宽度的“横线”,把美国技术特征比作一条具有深度的“竖线”,而177堆芯的技术特征则是兼顾宽度与深度的“矩形”,177堆芯颠覆了三代核电技术特征。在177堆芯二十余年研发历程中,以中核集团为攻关核心,联合国内外科研机构 and 制造企业,共同形成了我国核工业“强核心、大协作”军民融合技术创新体系。正如中国原子能科学研究院经营计划处技术人员所言,“和世界上同代核电技术相比,177堆芯的安全措施做到了最完善,技术标准做到了最严格,在一些代表核心技术的性能指标上已经做到了极致”(S₈)。

五、进一步讨论

本文围绕“国之重器如何实现复杂技术系统的整体赶超”这一研究问题,以中核集团为案例企业,聚焦于微观技术特征维度探讨了复杂技术系统的技术突破路径和内在机制,解构了复杂技术系统整体突破过程中微观技术细节随着技术演进脉络的演化特征,提炼出复杂技术系统技术突破与整体赶超路径机制的理论模型,如图6所示。具体而言,本文复杂技术系统的技术突破路径表现为“循环迭代—跃迁—单向演进”的非线性特征。本文探索出了案例对象从势能积聚到动能释放的非线性技术赶超路径,具体包含“技术机会识别—技术外力依附—自主技术积累”循环迭代的势能积聚过程和“技术机会创造—技术外力脱离—引领性技术创造”单向演进的动能释放过程,同时提炼出通过“驱动要素转换—主导动力更替—技术体系重置”的从势能积聚到动能释放的过程间非连续性跃迁内在机制。

1. 复杂技术系统技术突破路径

本文对177堆芯的技术轨道特征进行提炼,从自主技术轨道与外部技术轨道之间互动关系的动态演化视角解构了复杂技术系统的技术突破路径。177堆芯的技术突破历经两个过程,前一过程为循环迭代的势能积聚过程,后一过程单向演进的动能释放过程,具体分析如下。

(1)自主技术轨道势能积聚过程的实现路径。势能积聚过程中,自主技术轨道先后识别瞄准不同的外部先进技术轨道,依附于外部技术轨道吸收外部先进技术,进而逐渐完成外部技术自主化。在自主技术轨道势能积聚过程中持续循环上述过程以实现技术迭代。本过程内自主技术轨道与外部技术轨道之间互动关系演化如下:首先,自主技术轨道瞄准外部标杆技术轨道。在研发

起步阶段,基于对自身技术轨道的技术空缺的认知,瞄准世界前沿主导技术轨道,主动融入外部技术轨道,实现技术的快速获取和规模的快速扩张。其次,自主技术轨道主动依存于外部技术轨道。基于前沿技术引进打开与世界前沿技术互动的机会窗口,通过与外部前沿技术交流合作,同时参照模仿世界前沿技术,依附于国外主导的技术轨道。在此基础上结合自身需求,对外部前沿技术做出适应性改造。最后,自主技术轨道消化吸收外部技术轨道。一方面通过对技术底层原理性知识的引进与消化吸收逐步完成原理性知识自主化掌握,另一方面基于前期引进学习与改造翻版所积累的技术能力率先自主攻关核心层技术,由此实现从改造翻版到自主化积累的转变。随着行业技术的升级,自主技术轨道再次瞄准外部新的技术轨道,通过“技术机会识别—技术外力依附—自主化技术积累”势能积聚过程的漫长循环实现自身技术轨道的迭代升级。

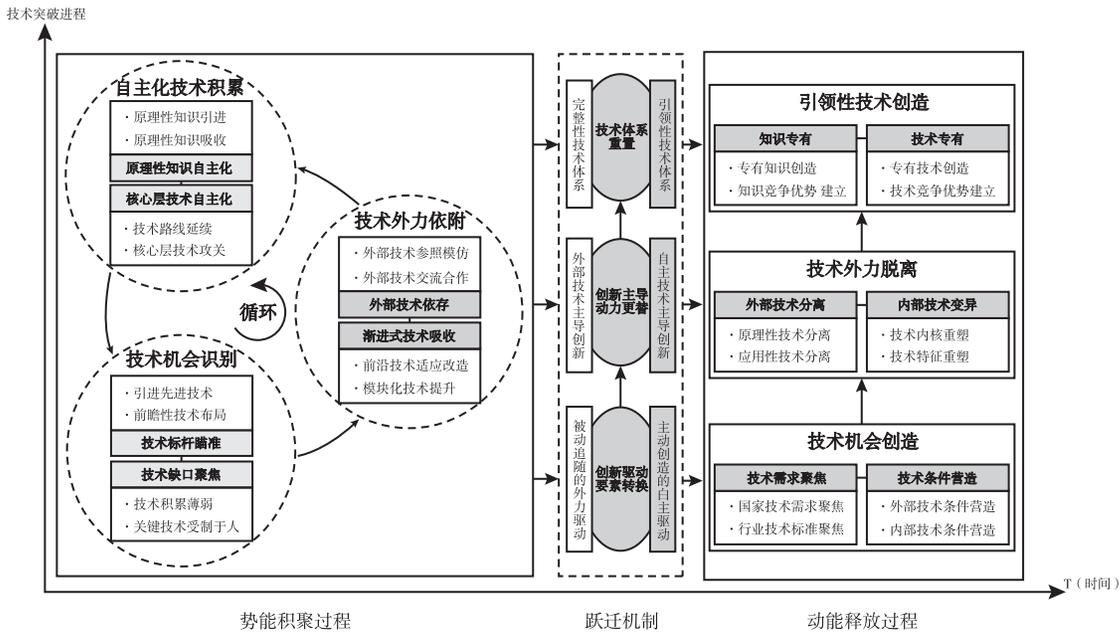


图6 复杂技术系统的整体赶超路径机制理论模型^①

(2)自主技术轨道动能释放过程的实现路径。由于外部环境变化与技术新趋势产生,原有依附的外部技术轨道已无法满足新技术需求。因此,在动能释放过程中自主技术轨道主动创造技术机会脱离外部技术轨道,创造自主可控的引领性技术体系。本过程内自主技术轨道与外部技术轨道之间互动关系演化如下:首先,自主技术轨道主动创造技术新机会。自主技术轨道聚焦技术需求变化窗口,明确未来攻关方向。同时进一步洞察外部技术条件,明确行业内技术竞争态势,营造技术条件、创造技术机会;其次,自主技术轨道脱离外部技术轨道。从底层原理性技术与上层应用性技术分离出对外部技术的依赖性,与此同时,重塑技术内核与技术特征,实现技术层面的完全独立自主;最后,自主技术轨道创造引领性技术体系,自主技术轨道超越外部技术轨道。基于基础学科层面的突破创造专有知识,通过对专有知识定位和体系耦合建立知识竞争优势。在此基础上,基于专有知识的固化和聚合创造专有技术,由此建立起引领技术标杆、重塑技术特征的技术竞争优势。

2.复杂技术系统技术轨道跃迁内在机制

复杂技术系统技术突破路径历经从势能积聚到动能释放的技术轨道非连续性跃迁,从微观机制来看,由缓慢循环迭代到快速单向演进的转变,是通过“创新驱动要素转换—创新主导动力更

^① 势能积聚过程表现为循环迭代的演化趋势,每次循环起始于“技术机会识别”,终点是“自主化技术积累”。

替—技术体系重置”的内在机制实现的。这一内在机制推动自主技术轨道突破由势能到动能的能量转化门槛,激活技术轨道能级非连续性跃迁临界状态的过程,具体分析如下。

首先是由技术机会识别到技术机会创造的跃迁。通过技术轨道创新驱动要素转换,打破原有技术轨道的自组织平衡状态,使技术轨道由基态转换为不稳定态。技术机会识别旨在利用已有的客观存在的技术机会来驱动自身技术发展,属于被动的过程。而技术机会创造则是基于对外界技术需求趋势的认知前瞻性描绘未来技术特征、制定未来技术标准,是主动规划布局技术研发方向驱动技术发展的过程。从被动识别机会到主动创造机会的跃迁,反映的是复杂技术系统的创新驱动要素由被动追随的外力驱动模式到主动创造的自主驱动模式的转换。创新驱动要素指引着复杂技术系统技术轨道发展方向,引领并激发技术创新活动。因此,创新驱动要素由被动追随的外力驱动到主动创造的自主驱动模式的转换,打破了原有外力驱动下的技术轨道的平衡状态,是复杂技术系统技术轨道由追随者向引领者身份跃迁的前提。

其次是由技术外力依附到技术外力脱离的跃迁。通过技术轨道主导动力更替,为处于不稳定态的技术轨道持续注入克服轨道能级势差的能量,势能的不断积聚使技术轨道由不稳定态逐渐过渡至激发态,技术轨道触及能级跃迁的临界值。技术外力依附是复杂技术系统发展早期主动融入并借助外部技术力量量的方式,其技术轨道创新主导动力源于外部技术轨道的拉动。技术外力脱离是复杂技术系统为了寻求新的技术突破创造而克服原有技术发展路径的过程,技术外力脱离标志着自主技术轨道创新主导动力更替为自主技术主导。从依附技术外力到脱离技术外力,反映的是复杂技术系统的创新主导动力由外部技术主导到自主技术主导的跃迁。创新主导动力为复杂技术系统技术轨道演化提供了最基础的内生动力,是复杂技术系统技术轨道跃迁过程得以持续的基础性支撑。

最后是由自主化技术积累到引领性技术创造的跃迁。通过技术体系重置,处于激发态的技术轨道突破能级跃迁的临界值门槛,通过能量的快速释放,将所积聚的技术轨道势能转化为动能。动能释放的同时,技术轨道实现由低能级向高能级的跃迁。自主化技术积累是自主创新能力形成与复杂技术系统技术体量快速扩张的过程,这一过程旨在逐步构筑完整的复杂技术系统技术体系。引领性技术创造通过创造颠覆现有技术性能与技术特征的引领性技术体系,形成技术标杆引领与技术特征与标准重塑,是形成引领性技术体系的过程。从自主技术积累到引领性技术创造,是复杂技术系统由量变到质变的跨越,反映的是复杂技术系统的技术体系由完整性到引领性的跃迁。颠覆原有技术体系进而创造新的引领性技术体系,实现自身技术体系的重置,是复杂技术系统技术轨道实现由追随者到引领者身份跃迁的标志。

六、结论与启示

1. 研究结论

本文通过中核集团 177 堆芯技术突破过程展开纵向案例研究,揭示了我国国之重器实现复杂技术系统整体赶超的路径机制。研究结论主要有以下四点:第一,国之重器类复杂技术系统的技术突破过程具有长历史周期性,本文复杂技术系统的技术突破路径具有非线性且不连续的特征。具体包含“势能积聚—动能释放”的两个过程,通过前期的漫长循环往复过程完成势能积聚,再经由后期的动能释放过程实现快速单向演进。第二,从微观技术细节维度来看,复杂技术系统的整体赶超过程中,自主技术轨道与外部技术轨道之间的互动关系不断动态变化。势能积聚过程内,自主技术轨道通过技术机会识别主动融入并依附外部技术轨道,完成技术的自主化积累;动能释放过程内,自主技术轨道主动创造技术机会,脱离外部技术轨道以及原有旧的技术体系,并创造出新的自主技术体系。第三,从势能积聚到动能释放的路径转换伴随着技术轨道的非连续性跃迁。

其中,复杂技术系统通过“技术驱动要素转换”“创新主导动力更替”“技术体系重置”的逐级累积激活技术轨道由基态向激发态的非连续能级跃迁,任何一级的缺失都将导致技术轨道无法突破跃迁门槛。

2. 理论贡献

第一,本文构建了复杂技术系统的技术整体赶超理论模型,基于技术轨道理论视角凝练总结出符合“国之重器”类复杂技术系统“势能积聚—动能释放”的非线性技术突破路径,丰富了复杂技术系统研究的理论视角。与已有文献中诸如高端装备制造领域(Chen等,2021)^[31]和半导体领域(Lee和Lim,2001)^[21]内的复杂技术系统的线性技术突破路径不同的是,本文密切关注到核工业领域内的“国之重器”类复杂技术系统技术攻关过程的“非线性和非连续性”等独特特征,区别于现有研究思路,本文提出“势能积聚—动能释放”的非线性技术突破路径。提炼出复杂技术系统技术突破前期“技术机会识别—技术外力依附—自主化技术积累”循环迭代的势能积聚过程,以及后期“技术机会创造—技术外力脱离—引领性技术创造”单向演进的动能释放过程。

第二,本文聚焦于技术轨道特征维度,通过提炼不同过程内复杂技术系统与外部技术之间互动关系的变迁,深度刻画了复杂技术系统技术轨道特征的动态演化,为复杂技术系统的技术突破提供了新的解释维度。从研究维度来看,与诸如精密工业机床(刘云等,2023)^[35]、中国高速列车(Genin等,2020)^[36]等复杂技术系统从资源、组织生态、组织制度等管理维度来解释技术突破路径不同的是,本文关注到核工业领域国之重器类复杂技术系统具有“研发周期漫长、参与研发单位众多且不断更替,不同管理要素之间繁交织,难以梳理并抽离出一条完整的管理维度的研究主线”的特殊性事实。因此,区别于其他文献从管理维度研究复杂技术系统的技术突破路径,本文深入微观技术维度,基于技术轨道理论解开了177堆芯技术突破的微观技术演化的黑箱。识别出技术突破不同过程内复杂技术系统自主技术轨道与外部技术轨道之间的互动关系演化情况,进而从技术轨道特征维度解释了复杂技术系统的技术突破路径机制。本文生动刻画了复杂技术系统技术轨道特征的动态演化,从技术特征的维度揭示出复杂技术系统的技术突破路径机制。

第三,本文解构了复杂技术系统整体赶超路径非连续性跃迁的内在机制,即“创新驱动要素转换—创新主导动力更替—技术体系重置”,完善了目前技术轨道理论对于技术轨道跃迁的内在机制关注不足的理论缺口,同时弥补了现有研究重视过程内的探讨,而对过程间衔接跨越的内在机制关注不足的研究缺口。关于复杂技术系统的技术突破,现有遵循技术逻辑的主流研究多以二次创新理论(Wu等,2009)^[13]、技术追赶理论(Kiamehr等,2015)^[10]等为研究视角。但是,现有研究大多聚焦于对过程内实现机制的解释,对于过程间的衔接跨越机制解释深度不足。本文深入挖掘并打开了复杂技术系统从“势能积聚”到“动能释放”的非连续性跃迁的实现内在机制,解构了技术机会、技术外力、技术积累与创造的转换跃迁机制,其中技术机会从识别到创造、技术外力从依附到脱离、自主技术从积累到创造,实现整体性跃迁。

3. 实践启示

本文研究结论对其他领域国之重器类复杂技术系统具有借鉴意义。第一,要深刻认识到复杂技术系统技术突破过程的长期性,复杂技术系统的技术突破需要历经漫长能量积累与冲击涨落,积聚和释放是复杂技术系统技术突破的两个必要的过程。同时,自主技术突破并非闭门造车,要充分学习和吸收外部先进技术,借助外部先进技术的拉动作用,实现自身技术水平的提升。在依附技术外力的同时,避免形成外部技术依赖,需要保持自身技术创新的能动性。第二,时刻感知外部环境对技术需求的变化,技术需求变化是创造新技术机会的重要窗口,同时对于后发追赶的复杂技术系统来说,通过技术机会创造来重塑技术特征,进而形成知识专有和技术专有,是实现由跟

跑到领跑身份转换的重要机会。其中,需要充分认识到知识的重要性,底层知识的创造是驱动创新、创造引领性技术的重要基础。第三,技术创新从“跟随者”向“领跑者”的跃迁是一个持续性过程,需要实现底层的创新驱动要素、中坚的创新主导动力、顶层的技术体系的整体性、系统性新旧转换,任何一个环节的缺失都无法激发跃迁机制。

关于经济层面与管理层面的建议。首先,在研发体系与产业生态构建及产业链强链、补链、延链方面,要以复杂技术系统的研发为重要依托,扶持、带动、构建起紧密协作的产业集群,引领上下游全产业链共同发展。以复杂技术系统研发为牵引,强化产业链薄弱环节,填补产业链空白领域,延伸产业链纵向与横向协同程度,推动建立以链长企业为核心的创新平台。第二,在宏观政策支持方面,国家政府或有关部门要持续加大对我国以核电为代表的重大工程或复杂系统发展的支持,尊重复杂技术系统类技术突破长期性的客观规律,为技术创新主体提供长期稳定的环境,包括政策支持与方向性引导等。第三,在打破低端锁定与路径依赖方面,我国已走过“用市场换技术”的初级发展阶段,当前正处于转变发展方式、优化产业结构、转换增长动力的关键期。复杂技术系统事关国家地位和国家安全,要通过底层技术创造形成自主技术体系,摆脱外部技术依赖,打破全球价值链的低端锁定。第四,在军转民以及军民融合方面,以核电技术为代表的复杂技术系统是典型的军民两用技术,通过军民融合发展实现装备、技术、人才、产业链的共享共用和相互转化,充分发挥民用技术的快速迭代与高效研发优势,实现军民技术的滚动发展。

4. 局限与展望

本文对技术轨道理论视角下国之重器实现复杂技术系统整体赶超相关问题进行了探讨,但仍存在一些不足之处:其一,本文仍然无法完全剔除可能存在的由于核工业本身特殊性而导致的研究结论普适性的不足。其二,本文虽然探讨了基于引进、模仿、改造、自主化、创造等方式的技术来源,但是对于不同技术来源之间的逻辑关系探讨深度不够,例如如何通过引进和模仿聚合出技术改造能力,这也是未来拟继续开展的研究课题之一。

参考文献

- [1]余江,陈凤,张越,刘瑞.铸造强国重器:关键核心技术突破的规律探索与体系构建[J].北京:中国科学院院刊,2019,(3):339-343.
- [2]张国宝.以科技创新为动力推动工业经济发展[J].北京:管理世界,2002,(10):1-2,11.
- [3]Hobday, M. Product Complexity, Innovation and Industrial Organization[J]. Research Policy, 1998, 26, (6): 689-710.
- [4]Zheng, M.G., J.Q. Yan, and S.T. Jun, et al. The General Design and Technology Innovations of CAP1400[J]. Engineering, 2016, 2, (1): 97-102.
- [5]柳卸林,葛爽.中国复杂产品系统的追赶路径研究——基于创新生态系统的视角[J].北京:科学学研究,2023,(2):221-229.
- [6]施海宁,应红,张涛,唐堂,宋金霖,龚频,汤晓斌. SiC探测器的中子和 γ 性能测试[J].上海:核技术,2024,(3):67-72.
- [7]赵长轶,谢洪明,郭勇,孔祥林.大国重器研制的关键核心技术突破——东方电气集团G50重型燃气轮机纵向案例研究[J].北京:管理世界,2023,(12):20-39.
- [8]欧阳桃花,曾德麟.拨云见日——揭示中国盾构机技术赶超的艰辛与辉煌[J].北京:管理世界,2021,(8):194-207.
- [9]赵耀升,宋立丰,毛基业,刘箭章.“北斗”闪耀——初探中国卫星导航产业发展之道[J].北京:管理世界,2021,(12):217-237.
- [10]Kiamehr, M., M. Hobday, and M. Hamed. Latecomer Firm Strategies in Complex Product Systems (CoPS): The Case of Iran's Thermal Electricity Generation Systems[J]. Research Policy, 2015, 44, (6): 1240-1251.
- [11]Miao, Y., J. Song, and K. Lee. Technological Catch-up by East Asian Firms: Trends, Issues, and Future Research Agenda[J]. Asia Pacific Journal of Management, 2018, 35, (3): 639-669.
- [12]吴晓波.二次创新的周期与企业组织学习模式[J].北京:管理世界,1995,(3):168-172.

- [13] Wu, X. B., R. F. Ma, and G. N. Xu. Accelerating Secondary Innovation through Organizational Learning: A Case Study and Theoretical Analysis[J]. *Industry & Innovation*, 2009, 16, (4-5): 389-409.
- [14] 彭新敏, 吴晓波, 吴东. 核心技术、互补资产与后发企业的超越追赶[J]. 北京: 科研管理, 2022, (7): 135-143.
- [15] 许晖, 李阳, 王治, 韩连胜. 大型复杂产品系统自主创新的模式与机制——基于“华龙一号”的探索性案例研究[J]. 北京: 管理世界, 2024, (9): 221-245.
- [16] Dosi, G. Technological Paradigms and Technological Trajectories[J]. *Research Policy*, 1982, 11, (3): 147-162.
- [17] Khanagha, S., M. T. R. Zadeh, and O. R. Mihalache, et al. Embracing Bewilderment: Responding to Technological Disruption in Heterogeneous Market Environments[J]. *Journal of Management Studies*, 2018, 55, (7): 1079-1121.
- [18] 陈傲, 柳卸林. 突破性技术从何而来? ——一个文献评述[J]. 北京: 科学学研究, 2011, (9): 1281-1290.
- [19] 杨武, 陈培, David, G., 孙世强. 技术轨道延伸与破解技术路径锁定研究——以光刻产业为例[J]. 北京: 科学学研究, 2023, (6): 1014-1026.
- [20] Kash, D. E., and R. Rycroft. Emerging Patterns of Complex Technological Innovation[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2002, 69, (6): 581-606.
- [21] Lee, K., and C. Lim. Technological Regimes, Catching-Up and Leapfrogging: Findings from the Korean Industries[J]. *Research Policy*, 2001, 30, (3): 459-483.
- [22] 郑素丽, 吴盛豪, 郭京京. 自动驾驶汽车技术轨道演进研究——基于社群识别和主路径分析的整合框架[J]. 北京: 科研管理, 2022, (2): 126-136.
- [23] Bergesk, A., C. Berggren, and T. Magnusson, et al. Technological Discontinuities and the Challenge for Incumbent Firms: Destruction, Disruption or Creative Accumulation?[J]. *Research Policy*, 2013, 42, (6-7): 1210-1224.
- [24] Yang, C. F. Innovation and development of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) project management mode[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2021, 8, (2): 312-320.
- [25] Majidpour, M. International Technology Transfer and the Dynamics of Complementarity: A New Approach[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 122: 196-206.
- [26] Li, D., G. Capone, and F. Malerba. The Long March to Catch-Up: A History-Friendly Model of China's Mobile Communications Industry[J]. *Research Policy*, 2019, 48, (3): 649-664.
- [27] 龚天宇, 袁健红. 复杂技术系统背景下技术体制新解[J]. 武汉: 管理学报, 2012, (6): 857-862.
- [28] Prencipe, A. Breadth and Depth of Technological Capabilities in CoPS: The Case of the Aircraft Engine Control System[J]. *Research Policy*, 2000, 29, (7-8): 895-911.
- [29] Baldwin, C., and E. A. V. Hippel. Modeling a Paradigm Shift: From Producer Innovation to User and Open Collaborative Innovation[J]. *Organization Science*, 2011, 22, (6): 1399-1417.
- [30] Gholz, E., A. D. James, and T. H. Speller. The Second Face of Systems Integration: An Empirical Analysis of Supply Chains to Complex Product Systems[J]. *Research Policy*, 2018, 47, (8): 1478-1494.
- [31] Chen, X. L., B. Guo, and J. J. Guo, et al. Technology Decomposition and Technology Recombination in Industrial Catch-up for Large Emerging Economies: Evidence from Chinese Manufacturing Industries[J]. *Management and Organization Review*, 2021, 18, (1): 1-36.
- [32] Park, T. How a Latecomer Succeeded in a Complex Product System Industry: Three Case Studies in the Korean Telecommunication Systems[J]. *Industrial and Corporate Change*, 2012, 22, (2): 363-396.
- [33] Majidpour, M. Technological Catch-Up in Complex Product Systems[J]. *Journal of Engineering and Technology Management*, 2016, 41: 92-105.
- [34] Danneels, E. Trying to Become a Different Type of Company: Dynamic Capability at Smith Corona[J]. *Strategic Management Journal*, 2010, 32, (1): 1-31.
- [35] 刘云, 郭栋, 黄祖广. 我国高档数控机床技术追赶的特征、机制与发展策略——基于复杂产品系统的视角[J]. 北京: 管理世界, 2023, (3): 140-158.
- [36] Genin, A., J. Tan, and J. Song. State Governance and Technological Innovation in Emerging Economies: State-Owned Enterprise Restructuration and Institutional Logic Dissonance in China's High-Speed Train Sector[J]. *Journal of International Business Studies*, 2020, 52, (3): 621-645.

- [37] Awate, S., M.M. Laren, and R. Mudambi. EMNE Catch-Up Strategies in the Wind Turbine Industry: Is There a Trade-Off Between Output and Innovation Capabilities? [J]. *Global Strategy Journal*, 2012, 2, (3): 205–223.
- [38] Lee, K., and F. Malerba. Catch-Up Cycles and Changes in Industrial Leadership: Windows of Opportunity and Responses of Firms and Countries in the Evolution of Sectoral Systems [J]. *Research Policy*, 2017, 46, (2): 338–351.
- [39] Mei, L., and N. Zhang. Catch up of Complex Products and Systems: Lessons from China's High-Speed Rail Sectoral System [J]. *Industrial and Corporate Change*, 2021, 30, (4): 1108–1130.
- [40] 路风. 冲破迷雾——揭开中国高铁技术进步之源 [J]. *北京: 管理世界*, 2019, (9): 164–194, 200.
- [41] Teece, D. Dosi's Technological Paradigms and Trajectories: Insights for Economics and Management [J]. *Industrial and Corporate Change*, 2008, 17, (3): 507–512.
- [42] Momeni, A., and K. Rost. Identification and Monitoring of Possible Disruptive Technologies by Patent-Development Paths and Topic Modeling [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2016, 104: 16–29.
- [43] Dosi, G. Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation [J]. *Journal of Economic Literature*, 1988, 26, (3): 1120–1171.
- [44] Li, X. Y., Z. H. Jiang, and Y. Q. Guan, et al. Fostering the Transfer of Empirical Engineering Knowledge Under Technological Paradigm Shift: An Experimental Study in Conceptual Design [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 41, 100927.
- [45] Capponi, G., A. Martinelli, and A. Nuvolari. Breakthrough Innovations and Where to Find Them [J]. *Research Policy*, 2022, 51, (1): 104376.
- [46] Suarez, F. F., S. Grodal, and A. Gotsopoulos. Perfect Timing? Dominant Category, Dominant Design, and the Window of Opportunity for Firm Entry [J]. *Strategic Management Journal*, 2015, 36, (3): 437–448.
- [47] Suarez, F. F. Battles for Technological Dominance: An Integrative Framework [J]. *Research Policy*, 2004, 33, (2): 271–286.
- [48] Adner, R., and P. Zemsky. A Demand-Based Perspective on Sustainable Competitive Advantage [J]. *Strategic Management Journal*, 2006, 27, (3): 215–239.
- [49] 周江华, 李纪珍, 刘子譔. 双重机会窗口下管理认知模式与创新追赶路径选择——以中国风电产业的后发企业为例 [J]. *北京: 中国工业经济*, 2022, (3): 171–188.
- [50] Nelson, R. R. Factors Affecting the Power of Technological Paradigms [J]. *Industrial and Corporate Change*, 2008, 17, (3): 485–497.
- [51] Miller, D. J., M. J. Fern, and L. B. Cardinal. The Use of Knowledge for Technological Innovation within Diversified Firms [J]. *Academy of Management Journal*, 2007, 50, (2): 308–326.
- [52] Saranga, H., A. Schotter, and R. Mudambi. The Double Helix Effect: Catch-Up and Local-Foreign Co-Evolution in the Indian and Chinese Automotive Industries [J]. *International Business Review*, 2019, 28, (5): 1–18.
- [53] 张立超, 刘怡君. 技术轨道的跃迁与技术创新的演化发展 [J]. *北京: 科学学研究*, 2015, (1): 137–145.
- [54] Gioia, D. A., K. G. Corley, and A. L. Hamilton. Seeking Qualitative Rigor in Inductive Research [J]. *Organizational Research Methods*, 2013, 16, (1): 15–31.
- [55] Robinson, D. K. R., A. Lagnau, and W. P. C. Boon. Innovation Pathways in Additive Manufacturing: Methods for Tracing Emerging and Branching Paths from Rapid Prototyping to Alternative Applications [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 146, (6): 733–750.
- [56] 许晖, 李阳, 刘田田, 谢丹丹. “专精特新”企业如何突破专业化“锁定”困境? ——创新搜寻视角下的多案例研究 [J]. *上海: 外国经济与管理*, 2023, (10): 3–19.
- [57] 张青, 吴玉翔. 战略前瞻性、能力形成与企业转型成长——基于杉杉股份的纵向案例研究 [J]. *北京: 经济管理*, 2023, (1): 105–124.
- [58] Ziman, J. *Evolutionary Models for Technological Change* [M]. Cambridge University, 2000.

How the Pillars of a Great Power Achieve Overall Catch-up in Complex Technical System: A Longitudinal Case Study of China's Nuclear Power Reactor Core

XU Hui¹, LU Yi-bin¹, LI Yang¹, WANG Ye²

(1.Business School, Nankai University, Tianjin, 300071, China;

2.China National Nuclear Corporation, Beijing, 100822, China)

Abstract: In the forging journey of China's "Pillars of a Great Power", the nuclear industry is one of the few industries that has achieved complete autonomy and control in key technological links. Under the difficult situation of weak technology accumulation and lack of independent innovation ability, the Complex Technical Systems represented by the "177 Core" has realized the transition from backward to leading position, and formed a unique path of technological breakthrough. However, there is a lack of theoretical explanation for the breakthrough process of nuclear core technology in China. Based on the longitudinal analysis of the technological breakthrough process of "177 core", the core component of HPR1000, this paper explores and then forms the theoretical model of the path mechanism of technological breakthrough of Complex Technical System.

The research findings of this paper are as follows. First of all, the technological breakthrough path of the Complex Technical System has significant nonlinear and discontinuous characteristics, which goes through two processes of "potential energy accumulation" and "kinetic energy release". "Potential energy accumulation" is a long cyclic iterative process, and "kinetic energy release" is a rapid unidirectional evolution process. Secondly, from the perspective of technological trajectory characteristics, the interactive relationship between autonomous technological trajectory and external technological trajectory has undergone a change from "attachment" to "detachment". Thirdly, the Complex Technical System realizes the non-continuous transition from circular iteration to unidirectional evolution through the internal mechanism of innovation-driven factor transformation, innovation-leading power replacement, and technology system reorientation.

The main contributions of this study are reflected in the following three aspects: Firstly, this paper constructs a theoretical model of technological breakthroughs in Complex Technical System. Based on the perspective of technological trajectory theory, this paper deconstructs the nonlinear technological breakthrough path that conforms to the Complex Technical System of "Pillars of a Great Power", and enriches the theoretical perspective of related research on Complex Technical System. Secondly, this paper focuses on the micro dimension of technological trajectory characteristics, and deeply describes the dynamic evolution process of technological trajectory characteristics of Complex Technical Systems by refining the changes of the interaction relationship between Complex Technical Systems and external technologies in different processes. Thirdly, this paper deconstructs the internal mechanism of the discontinuous transition of the technological breakthrough path of the Complex Technical System, It makes up for the theoretical gap that the current technological trajectory theory pays insufficient attention to the internal mechanism of technological trajectory transition. At the same time, it also makes up for the research gap that the existing research only pays attention to the discussion within the process, but pays less attention to the internal mechanism of the connection between the processes.

Lastly, this study outlines several managerial implications. The first recommendation is about the construction of national R&D system and industrial ecology and the strengthening of industrial chain. China should take the research and development of Complex Technical System as an opportunity to lead the common development of the upstream and downstream whole industry chain. The second recommendation is about national macro-policy. The government should respect the long-term objective law of technological breakthroughs in Complex Technical Systems and provide long-term and stable policy support for technological innovation activities. The third recommendation is about how to break the low-end lock-in and path dependence. China should form an independent technology system through the creation of the underlying technology. The fourth is about the civil-military integration. It is necessary to give full play to the rapid iteration and efficient advantages of civil technology and realize the rolling development of military and civilian technology.

Key Words: pillars of a great power; core of nuclear power plant; complex technical system; technological breakthrough; technological trajectory theory

JEL Classification: O32, O38

DOI: 10.19616/j.cnki.bmj.2025.01.002

(责任编辑:李先军)