doi. 10. 3724/1005-0566. 20251214

后发企业关键核心技术突破能力形成机理研究：基于“机会窗口—整合式创新”适配视角

杨仲基，盛兴余，武建龙，李　粉
（哈尔滨理工大学经济与管理学院，黑龙江　哈尔滨　150080）

摘　要：技术突破能力是制约后发企业实现关键核心技术自主可控的主要瓶颈，现有研究对其形成机理关注不足。基于“机会窗口—整合式创新”适配视角，以中车株洲所 IGBT 技术突破为案例，探究后发企业关键核心技术突破能力形成机理。研究发现：第一，关键核心技术突破能力遵循“工艺体系突破能力→关键产品自研能力→产品平台构建能力→技术生态控制能力”的形成路径，呈现螺旋上升的形成过程；第二，关键核心技术突破能力形成受到战略引领力、协同合作力、开放融合力和要素保障力四重动力综合作用；第三，不同机会窗口触发下，通过整合式创新响应，后发企业形成了适配的关键核心技术突破能力。研究结果丰富了整合式创新理论体系，推动了后发企业关键核心技术突破理论发展，为关键核心技术突破能力培育提供了启示。

关键词：后发企业；关键核心技术突破能力；整合式创新；机会窗口
中图分类号：F270　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005－0566(2025)12－0155－11

Research on key core technology breakthrough capability formation mechanism of latecomer enterprises: From the adaptive perspective of “windows of opportunity-holistic innovation”

YANG Zhongji, SHENG Xingyu, WU Jianlong, LI Fen
(*School of Economics and Management*, *Harbin University of Science and Technology*, *Harbin* 150080, *China*)

Abstract: The technology breakthrough capability is the main bottleneck that restricts latecomer enterprises from achieving full autonomy and the independent control of key core technologies. Existing research has inadequately addressed the formation mechanism of this capacity. This paper adheres to the “windows of opportunity-holistic innovation” adaptive perspective, and investigates the formation mechanism of the key core technology capability for latecomer enterprises using CRRC Zhuzhou Institute IGBT technology breakthrough as a case. The findings are summarized as follows: Firstly, the key core technology breakthrough evolves through a formation path of “craftsmanship system breakthrough capability→key products independently research and develop capability→product platforms construction capability→technological ecosystem govern capability”, the formation path demonstrate a spiral ascending process; Secondly, the formation of this capability is driven by strategic guidance force, collaborative cooperation force, open integration force, and resource assurance force; Thirdly, triggered by the windows of opportunity, latecomer enterprises have developed adaptive

收稿日期：2025-07-26　　**修回日期**：2025-12-16
基金项目：国家自然科学基金项目(72404071；72474060)；国家社会科学基金重大项目(22&ZD094)；教育部人文社科基金青年项目(24YJC630274)；黑龙江省社科基金项目(23JYC290)。
作者简介：杨仲基(1989—)，男，黑龙江哈尔滨人，哈尔滨理工大学经济与管理学院副教授，博士，研究方向为高新技术发展与创新管理。通信作者：武建龙。

capabilities for key core technology breakthrough through holistic innovation responses. This study enriches the theoretical system of holistic innovation, advances the theory of technology breakthrough for latecomer enterprises, and offers insights into cultivating the key core technology breakthrough capability.

Key words: latecomer enterprises; key core technology breakthrough capability; holistic innovation; windows of opportunity

推动关键核心技术突破是我国实现高水平科技自立自强的必由之路,也是发展新质生产力、推进中国式现代化的应有之义。西方国家长期占据芯片、大型工业设备等复杂产品领域的技术前沿,后发企业如何实现关键核心技术突破成为新兴经济体关注的焦点议题,既有研究形成两种观点。一是由于复杂产品具有较高的技术壁垒、相对稳定的技术轨道和高度定制化的市场需求,“冷启动”悖论使得后发企业陷入“追赶陷阱”无法超越[1]。二是后发企业能够通过自主学习、技术能力培育等实现复杂产品的核心技术突破与自主可控,并已经在中国高速列车、海上钻油平台等领域中得到验证[2]。可见,既有研究高度关注后发企业关键核心技术突破研究,聚焦于关键核心技术创新生态系统的适应性演进[3]、关键核心技术突破的组织边界演化规律[4]、参与国际技术标准对后发企业关键核心技术突破的影响[5]等问题。面对当前复杂多变的国内外环境,我国大国重器领域后发企业亟待解决核心技术“卡脖子”问题,培育和发展关键核心技术突破能力意义重大。

梳理发现,一方面,中国核电、大飞机等领域后发企业通过抓住技术范式变革、制度型市场等机会窗口快速实现赶超与行业引领,重大窗口期加速了关键核心技术突破[6]。但是,既有研究认为机会窗口只是后发者实现关键核心技术追赶与突破的必要非充分条件[7],不同类型机会窗口的出现时序、叠加作用强度、后发者响应速度等在不同行业呈现异质性,并且成功实现技术追赶与突破的行业均表现出机会窗口与行业创新范式的高度适配。如三类机会窗口与不同技术和市场战略的适配是中国安防行业后发企业成功追赶的关键[7];制度合法性的建立打开了韩国核工业技术赶超的机会窗口,但其与先进技术引进和学习策略的适配是韩国核工业进步的源动力[8]。换言之,即使后发企业面临着重大机会窗口,如果没有与之适配的创新范式,依然无法实现关键核心技术追赶与突破。

另一方面,既有研究从行业创新系统、创新生态系统等视角,强调技术、政府、互补企业等要素对关键核心技术追赶与突破的影响[9],并基于中国高铁、盾构机的案例,探讨政企能力共演、关键用户驱动、创新链产业链融合在技术追赶与创新中的作用机制[10-12]。总体来看,学者关于关键核心技术突破的研究呈现研究视角多元、研究发现各异、理论贡献不同的特点,但鲜有研究对后发企业关键核心技术突破能力进行系统性解构,关于关键核心技术突破能力如何形成的探讨存在理论缺口,特别是忽视了机会窗口出现时,后发企业如何适配创新战略和创新要素的微观机制研究。此外,本土创新理论在指导后发企业关键核心技术突破中的作用并未得到应有的重视[13]。

整合式创新是从系统高度和本土实践中提出的创新范式,强调通过企业战略引领、全面创新、协同创新和开放创新的系统性整合实现创新发展,成为审视后发企业关键核心技术突破能力的全新视角[13]。本文从“机会窗口—整合式创新”适配视角,深入挖掘中车株洲所绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor,IGBT)技术突破历程,试图回答后发企业如何形成关键核心技术突破能力,为大国重器领域后发企业把握关键机会、加快关键核心技术突破能力培育提供启发。本文的边际贡献:一是运用复合能力观解构关键核心技术突破能力,弥补了以往研究从单一静态能力视角解释关键核心技术突破能力的不足[10];二是遵循“条件—行为—结果”逻辑,将机会窗口这个重要的外生变量与整合式创新这一本土创新理论相结合,从两者适配视角探讨了关键核心技术突破能力形成的微观机制;三是丰富并拓展了整合式创新理论及其应用[13],深化了对本土创新

理论的认识。

一、文献综述与研究框架

(一)关键核心技术突破能力界定

关键核心技术是制约大国重器领域复杂产品发展的决定性力量,单一主体难以独自完成全部技术活动[14],实现突破的首要条件是提升技术创新能力,即创造新产品和新工艺的能力[15],后发者可以通过复刻、模仿到创新,实现技术创新能力提升[16]。然而,复杂产品创新需要大量资源投入,组织能力被视为影响复杂产品系统创新的重要因素[17]。根据资源基础理论和动态能力理论,资源组织能力是企业为实现特定组织目标进行资源协调、运营与配置的能力[18],强大的资源组织能力表现为企业以与众不同的方式部署资源。目前,资源基础理论呈现从传统资源基础观、动态资源基础观到资源行动观的演进,其中传统资源基础观重视企业通过资源协调、运营等获得异质性资源与竞争优势,而动态资源基础观则强调在动态和不确定性情境下的资源整合。相比之下,资源行动观结合"资源管理"的过程思想和"资源编排"的协同思想,突出对资源的组合重构[18]。

为此,本文基于复合能力观,将关键核心技术突破能力界定为由技术创新能力与资源组织能力构成的复合能力系统,其中技术创新能力是内核,资源组织能力是外延。

(二)机会窗口与后发企业关键核心技术突破

新的技术经济范式出现可能为后发企业带来机会,因为后发企业能够比先发者更快速、更果断地实施跨越式战略。Lee 等[19]将其与部门创新体系联系起来,提出技术、需求和制度 3 种类型的机会窗口。首先,先发者受限于组织惯性和技术锁定效应的"创新者窘境",后发企业更能够抓住新技术涌现机会实现超越;其次,商业周期和供需关系的不确定性会引发需求机会窗口;最后,新兴经济体中政府创造的制度机会窗口尤为重要。然而,后发企业能否成功实现关键核心技术突破,还取决于对机会窗口的反应和技术能力积累[20]。研究发现,当后发企业技术学习能力水平较低时,难以把握市场和技术机遇,要想获得机会窗口先机,企业必须整合自身优势培养复合能力[21]。

(三)整合式创新与关键核心技术突破能力

既有研究认为关键核心技术突破要做好产学研深度融合、创新联合体建设等[22-23],但对战略、组织、制度等维度关注不够。同时,用户创新、模仿创新等存在侧重某类特定创新主体、具体创新环节或创新方法的先天不足,而开放式创新、全面创新等又过于强调知识、资源等要素的横向关联,缺乏对战略引领作用的重视。为此,整合式创新应运而生,其核心思想在于克服原子论思维方式,通过战略引领和设计,实现"开放、协同、全面"的要素整合[13]。基于整合式创新视角,尹西明等[24]剖析了新竞争环境下企业加快颠覆性技术突破的路径选择;吴欣桐等[25]以中国高铁为案例,验证了"整合式创新"理论框架在重大科技创新工程中的可行性;杜丹丽等[26]通过纵向案例研究,解释了华为在组织警觉支撑下从追赶到超越的全过程。然而,既有研究尚未关注整合式创新理论在关键核心技术能力形成中的应用。

(四)研究框架

现有研究已经考虑到不同类型机会窗口开启与叠加作用引发的关键核心技术突破机遇,也肯定了整合式创新对关键核心技术突破的影响,但忽视了机会窗口与整合式创新如何适配并推动后发企业形成关键核心技术突破能力,并且对不同阶段后发企业关键核心技术突破情境的差异性关注不足。为此,本文遵循"条件—行为—结果"分析逻辑,从"机会创新—整合式创新"适配视角,揭示后发企业如何形成关键核心技术突破能力。鉴于我国轨道交通装备、高档数控机床等领域机会窗口的开启呈现一定的时序性特点,本文从机会来源和不确定性两个维度识别机会窗口[27],研究框架如图 1 所示。

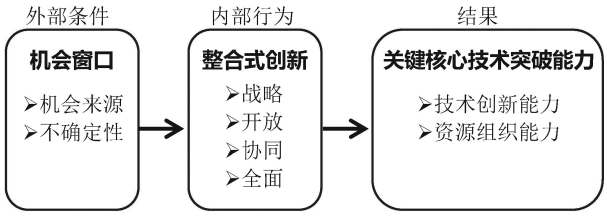

图 1　本文研究框架

二、研究设计

(一)研究方法

本文采用纵向单案例研究方法,其原因是:第一,后发企业关键核心技术突破能力形成机理研究是一个典型的“如何”问题,基于归纳逻辑的单案例研究适合于对未被充分理解的现象进行理论构建,很好地契合了本文的研究问题[28];第二,纵向案例研究有助于深入剖析中车株洲所 IGBT 技术突破过程,提高内部研究效度;第三,本文聚焦关键核心技术突破能力形成的过程机制,纵向案例通过关键事件和情境显现,突出了时间维度在理论模型中的重要性,提高了研究的实践指导价值[29]。

(二)案例选择

本文遵循理论性抽样,按照以下原则选择中车株洲所为案例对象。一是典型性原则,株洲所建成了国内首条 8 英寸高压 IGBT 芯片生产线,率先实现了 IGBT 技术国产化,打破了轨道交通和特高压输电核心器件由英飞凌、三菱等国外巨头垄断的局面,具有极端代表性;二是适配性原则,IGBT 芯片作为复杂产品,其生产过程涉及 200 多道工序和温度、气流、时间等上千个参数,株洲所作为国内最早具备 3 300 V 以上高压 IGBT 芯片生产能力的企业,2024 年在轨道交通和电网领域的 IGBT 模块交付占有率国内第一,研究其技术突破历程有助于本文问题的解决;三是数据可得原则,株洲所经历了从技术落后到突破关键核心技术的完整历程,研究团队通过现场调研、访谈等掌握了大量数据,能够全面、完整地体现关键核心技术突破的相关细节。

(三)数据收集

多源数据既满足丰富性原则,又便于“三角验证”,确保研究信度和效度。本文数据来源如表 1 所示。

1. 半结构化访谈

研究团队与株洲所高层管理人员、技术人员和基层管理者就研究主题开展多次开放式研讨,累积形成 8 万余字文本资料。访谈信息如表 2 所示。

表 1　数据来源

数据来源	类别	内容
半结构化访谈	文档	访谈株洲所总工、半导体产业中心相关人员、海外研发中心人员等
内部资料	文档	株洲所年报、领导批示和讲话、战略规划等
	研究报告	《中国高铁自主创新模式研究》《株洲厂所结合发展路径及推广模式研究》等
	会议讲话	董事长、副总裁等高管在 2023 年供应链大会的讲话
外部资料	新闻报道	美丽株洲公众号、株洲所官网、公司高管讲话
	书籍论文	《追寻轨迹》《新火:走向自主创新 2》《中国高铁技术赶超:制度激励与能力构建》等 7 部书籍和国内外文献 40 余篇
	行业报告	《Status of the Power Electronics 2023》《中国功率半导体行业发展趋势及竞争策略研究报告》等 7 份

表 2　半结构化访谈

访谈对象	访谈内容	次数/次	时长(约)/min
总工程师	企业发展 IGBT 的主要历程、面临的机会窗口、改革措施等	2	120
副院长 A	关键核心技术突破历程、机会窗口、改革措施与效果等	2	120
总裁办公室秘书 A	企业发展 IGBT 的决策过程、机会窗口、改革措施与效果等	1	60
技术管理人员 A	IGBT 产品布局、项目管理模式、技术管理举措与成效等	3	240
技术管理人员 B	IGBT 产品布局、项目管理模式、技术管理举措与成效等	2	120
研发人员 A	IGBT 产品特点、技术优势、面临挑战等	1	40
研发人员 B	IGBT 产品特点、技术优势、面临挑战等	1	60
海外研发中心管理人员 A	IGBT 海外研发中心概况、面临的机会窗口、机构作用等	2	150

2. 内外部资料

研究团队系统整理了株洲所技术创新相关资料,包括宣传手册、内部文件、内部研究报告、党课学习资料等,并整理了下属上市公司时代新材和时代电气 2018—2023 年公司年报。收集了株洲所官网和公众号文章、视频、新闻媒体报道、相关论文和书籍资料。

3. 实地观察和参与式观察

研究团队 4 次到株洲所展厅、IGBT 生产车间、创新工作室等企业内部机构实地观察,收集大量现场资料。参加中车现代产业链共链行动大会,收集了 3 名集团高管、总工程师、业务主管等人员

的汇报材料,与地方政府主管部门、4 家供应链企业负责人进行现场交流。

三、案例分析与讨论

全面梳理引发株洲所外部机遇、战略变革与能力变化的关键事件,代表性时间节点包括 1985 年引进美国半导体技术,开始了技术消化吸收;2008 年国家推动高铁自主创新,为株洲所打开了制度机会窗口;2017 年株洲所建成国内首条 6 英寸 SiC 芯片生产线,大幅提升了国产芯片的竞争力。为此,按照时间线将本案例划分为自力更生阶段(1984 年之前)、引进吸收阶段(1985—2007 年)、自主创新阶段(2008—2016 年)和自立自强阶段(2017 年至今)。

(一)关键核心技术突破能力形成过程

1. 自力更生阶段(1984 年之前)

株洲所抓住需求机会窗口,通过基础级整合式创新,构建了工艺体系突破能力。

(1)需求机会窗口。面对国家铁路电气化和铁路机车国产化需求,仅成立 5 年的株洲所组建“半导体小组”,于 1968 年成立专门的半导体器件室开始相关技术探索。1970 年前后全国掀起了单晶硅研制热潮,株洲所着手自主研制单晶硅,但仍存在诸多技术问题,许多项目被相继叫停。

(2)基础级整合式创新。表现为整合式创新各子维度的全面启动,具体来看,战略引领维度,株洲所面临科技体制、行政体制和管理体制不对称的局面,采取改革型战略行动,主动要求一次性全面取消“事业费”,以应对改革开放带来的市场经济冲击。在开放创新维度,株洲所积极参加国内各大工厂、科研院所的功率半导体技术交流。在协同创新维度,科技体制改革之后,株洲所抓住机会以独立科研实体的角色参与各类科技攻关任务,与铁道科学研究院、北京变压器厂等 30 个单位和主机厂联合研制,花费近 8 年时间,完成整流器“改硅”。在全员创新维度,株洲所通过科研合同制、收入按照比例留成等制度引导全员重视科研,强调人人创新意识,充分发挥各部门人员创新积极性。

(3)工艺体系突破能力。在外部资源匮乏的情况下,株洲所撤组改室,健全组织管理机构,确立办公室、科研科、物资设备科等职能部门和机械、电机电器等研究部门,以共同研制的组织方式协调各类资源,先后成功研制了 1 200V/500A 硅整流器和 4 台硅器件动态测试台,开发了 TTL 和 HTL 双极型集成电路,自制单晶炉 1 台,实现单晶硅悬浮区熔法和直拉法工艺创新。虽然在生产过程中存在诸多技术问题,但仍形成了从单晶硅拉制、切片割圆到封装的工艺体系,也为自主研制功率半导体创造了条件。

2. 引进吸收阶段(1985—2007 年)

株洲所抓住技术和制度双元机会窗口,通过初阶整合式创新,构建关键产品自研能力。

(1)技术和制度双元机会窗口。在技术机会窗口维度,1985 年株洲所引进美国西屋公司的 3 英寸半导体产线,虽然设备配置并不完整,且集成了众多国产及自研装备,但在工程师的巧妙改造下,成功实现了传统半导体工艺流程的细化分解。这一创新举措使得该生产线成为同期我国引进的 12 条半导体生产线中最为成功的一条。同年,株洲所贷款 75 万美元,引进印制板生产设备,建立印制板全自动生产线,为关键核心技术突破打下坚实基础。在制度机会窗口维度,利用国家大力实施的招商引资政策,2002 年株洲所、株洲电力机车厂与西门子公司签订合资协议,不仅从西门子获得了功率半导体领域方面的先进技术和管理经验,还得到西门子在国际市场的半导体销售渠道。从不确定性程度来看,在国家技术引进政策支持下,株洲所吸收了主辅变流器等功率半导体器件的核心知识,技术风险和政策不确定性较小。

(2)初阶整合式创新。表现为整合式创新各子维度的范围和程度有所增加。具体来看,在战略引领维度,株洲所采取激进型战略行动,时任丁所长强调:“改革就是要破釜沉舟,背水一战,就算掉下来也没关系,总比不改变要好。”1985 年开始,株洲所尝试“一所两制”的制度,率先走上“科工贸”一体化道路。在开放创新维度,株洲所合资创办了株洲时代电器铸件有限责任公司等企业,参

与美国、瑞典等国家变流器、硅器件接片工艺的研讨学习。在协同创新维度,株洲所联合河南思达公司、北京交通大学、原铁道部等多方主体开展变流器和整流器联合攻关;与法国 FCG 公司合作生产主整流柜和辅助变流器。在全面创新维度,一是全所人员无论从事横向开发还是参与经营活动,都有用武之地;二是采用“技贸结合”和“技术引进”相结合的方式加速内外部技术集成;三是协调各地子公司进行集权管理,完善现代化企业管理制度。

(3)关键产品自研能力。株洲所主动吸收外界优势资源,加速内部资源积累,形成“以我为主”的科研道路。从瑞典 BBC 公司和德国西门子等公司引进先进技术,通过消化吸收,研制了专用集成电路、厚膜电路和小岛浇铸工艺,并自主开发了全压接器件、首批 IGBT 模块样机和带有自主知识产权的高性能 IGBT 驱动板,填补了我国大功率 IGBT 牵引变流器的空白,随后成功研制大功率 GTO、IGCT 系列产品,在自关断型器件的研究、开发、试验与应用等方面积累了丰富经验。2007 年我国铁路第六次提速,依托株洲所在国内交流传动技术方面的领先地位和自身强大的资源运营能力,其占据了首批投入运营的 52 列国产化高速动车组动力和控制系统 70% 的份额,特别是实现了自主研制的功率半导体上车运行。

3. 自主创新阶段(2008—2016 年)

株洲所抓住了制度和需求双元机会窗口,通过中阶整合式创新,形成产品平台构建能力。

(1)制度和需求双元机会窗口。在制度机会窗口维度,2008 年国家出台《中国高速列车自主创新联合行动计划》等一系列自主创新政策,推动铁路装备自主化。在需求机会窗口维度,功率半导体应用场景持续拓宽,高压直流输电、风力发电、工业变流等新兴市场需求越发旺盛和紧迫,株洲所面临需求机会窗口的高不确定性。

(2)中阶整合式创新。表现为整合式创新各子维度的整合力度更大,具体来看,在战略引领维度,株洲所面对强劲的功率半导体器件需求,实施双元型战略行动,将功率半导体应用从轨道交通拓宽到新领域。在开放创新维度,株洲所积极响应“走出去”和“引进来”,收购了英国丹尼克斯半导体公司 75% 的股份,走向全球化,提高了我国轨道牵引用 IGBT 器件、高压晶闸管的研究水平。在协同创新维度,一方面,株洲所参与和谐号、复兴号等高速动车组项目,搭建芯片研制、模块封装、测试应用产业链平台;另一方面,集成并协同多方优势科研力量完成核心器件国产化,与此同时,搭载高性能变流器的城际列车和光伏逆变器开始进入欧洲和东南亚市场。在全面创新维度,株洲所整合株洲和英国林肯两个基地的研发制造资源,实现国内外时间同步、空间协同,持续推进 IGBT 功率器件技术迭代。

(3)产品平台构建能力。首先,2008 年株洲所采用全新 ERP 系统,维护了自主知识产权和信息安全。其次,株洲所构建子母公司体系,实现“1 + 1 > 2”的整体效益,探索“本地化制造、本地化采购、本地化用工、本地化服务、本地化营销”经营模式。最后,株洲所凭借产业化进程助力 IGBT 产品系统集成,2009 年我国最大功率半导体器件生产及研发基地在湖南株洲建成并投入使用,同时与多家功率半导体公司展开技术合作并建立产业联盟关系,到 2014 年,株洲所建成我国首条 8 英寸 IGBT 芯片线,一举打破国外在高端 IGBT 芯片领域的垄断局面。此时,株洲所已经掌握 IGBT 多芯片并联、衬板加装、基板加装、硅胶固化等工艺,技术水平晋升国际第一梯队。

4. 自立自强阶段(2017 年至今)

株洲所紧抓多维机会窗口,通过高阶整合式创新,形成技术生态控制能力。

(1)多维机会窗口。多维机会窗口的开启为株洲所实现技术引领创造了条件。在技术维度,以碳化硅和氮化镓为代表的第三代功率半导体成为新的发力点。在制度维度,国家实施强基工程,重点突破 IGBT 先进工艺和碳化硅、氮化镓等功率半导体技术。在需求维度,新能源等领域的功率半导体需求持续增长。从不确定性程度来看,贸易摩擦频发、碳化硅技术成本高昂、大功率 IGBT 市场饱和等加剧了不确定性。

(2)高阶整合式创新。表现为整合式创新各子维度的程度、范围和力度有了根本改变,具体来看,在战略引领维度,株洲所以建设世界一流企业为目标,实施进攻型战略行动,开始参与全球业务竞争。在开放创新维度,与剑桥、清华等构建全球产学研用开放生态,打造高效变流、超精细沟槽STMOS等原创技术策源地,形成涵盖"关键器件、部件、总装集成"的新一代功率半导体技术生态。在协同创新维度,株洲所以数字技术为手段,通过建立供需协同、链式推进等动态机制,实现整机带动部件发展。在全面创新维度,株洲所主动协同地方政府,通过"风光储"等项目将整流器、制氢IGBT产品布局到全国。

(3)技术生态控制能力。株洲所充分发挥半导体垂直整合制造模式的优势,构建功率半导体设计、生产、测试和应用一体化的完整技术链。一方面,株洲所加速"机器视觉+运动规划"驱动制造柔性升级,保障晶圆级先进封装核心工艺,形成"产品+"和"系统+"新业态,构建起覆盖低压、中压、高压的功率半导体器件布局。另一方面,株洲所集聚国内外60余家专注IGBT大功率半导体的企业进行产业链生态合作,并联合多所高校共同打造"探索一代、预研一代、应用一代"的生态体系。

(二)关键核心技术突破能力形成路径

综上,后发企业关键核心技术突破能力遵循"工艺体系突破能力→关键产品自研能力→产品平台构建能力→技术生态控制能力"形成路径,由于复杂产品的主导技术迁移缓慢,同时存在能力积累效应,后发企业只有在实现低阶能力积累之后才可能实现高阶能力突破。因此,后发企业关键核心能力呈现螺旋上升的形成过程,如图2所示。

1. 工艺体系突破能力形成路径

工艺是产品生产过程中设备、劳动力、任务规范、材料投入、工作和信息流等组成的系统工法,工艺体系突破能力是后发者掌握复杂产品制造工法知识并通过资源构建实现多种工艺的能力。经典A-U模型解释了先发者技术创新的策略选择,

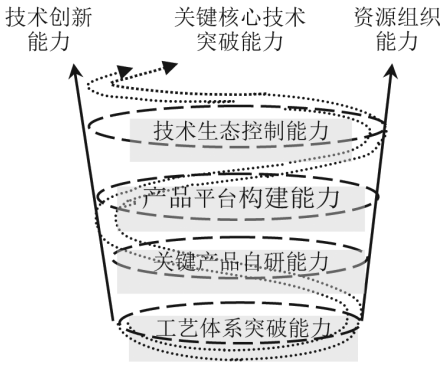

图2　后发企业关键核心技术突破能力形成路径模型

但后发者由于缺乏对复杂产品设计的先验知识,无法直接掌握产品的原理性知识,通常基于问题驱动的工艺迭代,更容易形成工艺体系突破能力。具体来看,1959年成立之初,株洲所承担了解决我国第一代电力机车引燃管整流器逆弧、熄弧问题的研究任务,由于技术进口受到严格限制,株洲所只能从自制单晶炉、磨片、抛光等半导体制造的简单工艺入手,通过模仿和试错,主动进行人才、设备、资金等各类资源构建,最终实现整流器"改硅",奠定了大功率半导体技术突破的工艺基础。

2. 关键产品自研能力形成路径

产品是企业把市场需求和技术可能性结合并转化为生产力的关键,大国重器领域复杂产品涉及多个模块、多种技术架构及其组合,后发者能否实现产品原型设计是判断其技术突破能力的标志。关键产品自研能力是指后发者掌握产品原理性知识并通过资源运营实现原型开发的能力。根据二次创新的观点,后发者要结合本土市场需求,通过产品创新实现对引进技术的挖潜增效[30]。具体来看,中车株洲所一方面借助政策红利,实施"引进—消化—吸收",学习法国主变流器、日本牵引逆变器、美国和瑞典大功率半导体、硅器件的制造工艺和产品设计原理,另一方面,充分发挥改革精神,进行组织结构、人才、生产、管理等多维度创新,提高株洲所内外部资源的运营效率,结合我国铁路机车事业发展需求,率先实现了高压IGBT产品的原型开发和生产,并在国产化高速列车上装车运行。

3. 产品平台构建能力形成路径

产品平台是一个包含产品序列、人员和支持系统的有组织活动系统,对大国重器领域后发者而言,构建产品平台是实现从“技术引进”到“自主创新”的关键,如果不能建立产品层面的开发平台,意味着上下游合作企业丧失了技术学习的动力,从而无法实现关键核心技术和各子技术的更新迭代与技术突破。产品平台构建能力是指后发者掌握产品系统集成知识并通过资源协调开发产品平台的能力。具体而言,中车株洲所通过技术收购获得了 IGBT 半导体设计、测试、封装的系统化成熟知识,并将大批国内工程师送到英国交流学习,加速了 IGBT 子技术模块的隐性知识积累,2014 年建成我国首条 8 英寸 IGBT 芯片线,意味着株洲所形成了 IGBT 产品平台构建能力。

4. 技术生态控制能力形成路径

技术生态是对技术核心组件、非核心组件以及环境之间作用关系的描述,关键核心技术突破,一方面要实现核心组件的功能性、性能性和可靠性突破,另一方面更需要非核心组件的技术赶超,并且做到自主可控。技术生态控制能力是指后发者自主掌握产品系统知识体系并通过资源重构实现技术生态发展的能力。具体而言,株洲所以器件为根技术,采用集成设计制造模式,实现从 IGBT 芯片设计、生产制造、封装测试到产品上市的全链条可控,系列产品应用于国家特高压输电工程、新能源汽车、轨道交通等诸多领域,形成了自主可控、安全可靠和开放共赢的 IGBT 技术生态。

(三)关键核心技术突破能力形成动力

后发企业关键核心技术突破能力遵循螺旋上升态势依次演进,其阶段性能力形成是后发企业及时响应机会窗口,进行整合式创新适配的结果,从整合式创新关键要素来看,关键核心技术突破能力形成过程受到战略引领力、协同合作力、开放融合力和要素保障力四重动力综合作用。

1. 战略引领力

战略引领作为创新发展的重要引擎,是后发企业面对不确定情境时保持正确发展方向并推动持续追赶的首要力量。然而,战略引领在后发追赶中的作用被主流文献忽视[13]。株洲所在 IGBT 技术突破过程中,通过改革型战略行动、激进型战略行动、双元型战略行动和进攻型战略行动,引领不同技术突破阶段的创新活动。自力更生阶段,株洲所在面临技术和人才匮乏的双重困境时果断开启改革,主动要求一次性全面取消“事业费”,以市场机制倒逼内部创新活力,通过资源构建初步形成单晶硅工艺体系。在引进吸收阶段,株洲所采取了更加激进的战略行动,结合引进的先进技术和自研技术,通过内外部资源运营,推出大功率 IGBT 器件系列化产品,奠定了关键产品自研能力基础。在自主创新阶段,株洲所采取双元型战略行动,不仅保证高压 IGBT 技术领先,在高压电网、轨道交通领域形成先发优势,还自研车规级 IGBT 芯片,进军新能源汽车领域。在自立自强阶段,株洲所瞄准世界一流企业目标,采取新兴领域突进和新一代功率半导体优先布局的进攻策略,通过全产业链资源重构,打造了安全可控的 IGBT 技术生态。

2. 协同合作力

协同创新是以知识增值为目标,跨越企业、大学、政府等多个主体的创新组织模式。对后发企业而言,由于缺乏核心技术、市场和资源优势,并不具备开展协同创新的先天条件,因此主流技术追赶研究并未过多关注协同创新在追赶过程中的重要作用。然而,株洲所通过内部协作、内外协同、多场景协同和自适应协同加速了 IGBT 技术突破能力形成。首先,尽管我国早期铁路系统处于封闭状态,但株洲所与内部的相关企业和高校开展 IGBT 技术合作,为工艺突破奠定基础。其次,随着铁路管理体制的改革,株洲所开始与清华大学、北京交通大学等多元主体开展联合技术攻关,助力 IGBT 关键产品研发。再次,铁道部政企分离进一步释放创新活力,株洲所与国内外顶尖企业和高校进行协同合作,获取了更加丰富的 IGBT 技术知识。最后,利用数字技术平台,株洲所实现了光伏逆变器和制氢电源等装备研发的产学研多主体、研产销服多环节有机协同,加速了技术生态控制能力形成。

3. 开放融合力

开放式创新强调企业同时利用内外部创新资源进行商业化的活动。先发者通过技术转移把相对落后的关键核心技术开放给后发者,一方面获得创新收益,另一方面使得后发者形成路径依赖,陷入“引进—消化吸收—再引进”的陷阱。对后发企业而言,通过更大范围开放,主动获取内外部资源成为最佳选择。株洲所通过厂所结合、业内开放、国内外开放、生态开放,持续扩大资源获取范围,助力 IGBT 技术突破能力形成。首先,株洲所加强与株洲厂的联系,探索能够促进硅半导体在电力机车上大规模应用的工程化方式,是早期形成工艺突破能力的关键。其次,株洲所积极向德国西门子、日本三菱等领先者开放,在学习硅器件相关工艺的同时获取逆向产品解构机会,为关键产品自研奠定知识基础。再次,株洲所依托技术同心多元化搭建了以 IGBT 为根技术的网络,通过海外并购、深度项目合作等,形成国内外资源开放系统,积累了产品平台构建能力的资源基础。最后,株洲所承担架构者职能,开放 IGBT 技术生态,吸引从基础材料、器件制造到应用的各类企业以及从事 IGBT 研发的科研机构参与,推动形成自主可控的 IGBT 技术生态。

4. 要素保障力

创新要素是创新活动开展所需要核心资源和条件的集合,通过有效的创新管理机制调动全要素有助于企业实现全面创新[31]。后发者往往不具备调动全要素参与创新的项目能力,而领先者也不会主动输出系统集成方案,造成后发企业追赶壁垒。株洲所通过全员、全要素、全时空、全维度要素保障逐步形成 IGBT 技术能力。首先,株洲所实行“四个打破”,激活科研人员积极性,为工艺体系突破能力奠定坚实的组织基础。其次,株洲所实施技术、管理、人才、文化等全要素的系统整合,确保了关键产品自研能力形成的基本要素。再次,株洲所在时间、空间上进一步扩展要素保障,做到即时创新、人人创新、事事创新,从更大范围和尺度强化了产品平台构建能力形成所需要的关键要素。最后,基于本地加异地研发平台、全球资源网络和多元主体,全方位保障了技术生态控制能力形成。

(四)关键核心技术突破能力形成规律

结合后发企业关键核心技术突破能力形成路径和动力,归纳关键核心技术突破能力形成规律,理论模型如图 3 所示。具体而言,在不同类型机会窗口触发下,后发企业通过适配的整合式创新响应,在战略引领力、协同合作力、开放融合力、要素保障力共同作用下,依次形成工艺体系突破能力、关键产品自研能力、产品平台构建能力和技术生态控制能力,最终实现关键核心技术突破与自主可控。

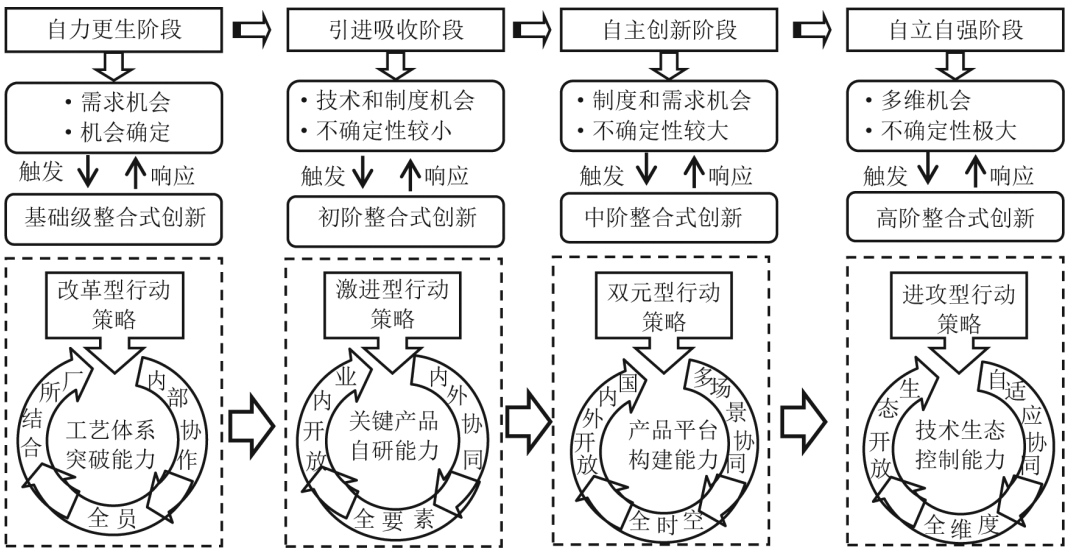

图 3　后发企业关键核心技术突破能力形成规律的理论模型

四、结论与启示

(一)研究结论

第一,揭示了后发企业关键核心技术突破能力形成路径。大国重器领域后发企业经历关键核心技术自力更生、引进吸收、自主创新和自立自强四个突破阶段,形成了工艺体系突破能力、关键产品自研能力、产品平台构建能力、技术生态控制能力,并呈现螺旋上升的能力演化过程。

第二,发现了后发企业关键核心技术突破能力形成动力。大国重器领域后发企业关键核心技术突破能力形成受到战略引领力、协同合作力、开放融合力、要素保障力四重动力综合作用,不同动力作用方式和程度随着关键核心能力演化而发生变化。

第三,构建了从机会窗口触发、整合式创新响应到关键核心技术突破能力形成的规律模型。发展了“机会窗口—整合式创新—关键核心技术突破能力”理论框架,发现了不同类型机会窗口的开启时序,及其与不同类型整合式创新的适配关系。

(二)理论贡献

第一,本文完善了复合能力观,提出关键核心技术突破能力是技术创新能力和资源组织能力组成的复合能力系统,阐释了不同阶段关键核心技术突破能力内涵,打开了关键核心技术能力“黑箱”,与既有研究相比[10],弥补了从单一静态能力观解释关键核心技术突破能力的不足,推动了大国重器领域后发企业关键核心技术突破能力理论发展。

第二,本文拓展了机会窗口在大国重器领域的研究,从“机会窗口—整合式创新”适配视角深入探讨了关键核心技术突破能力形成机理,有力地支持了既有研究中机会窗口只是后发者实现关键核心技术追赶与突破的必要非充分条件这一观点[7],同时为关键核心技术突破能力研究提供了全新的理论框架。

第三,本文丰富了整合式创新理论内涵,阐明了机会窗口与整合式创新适配对关键核心技术突破能力的重要作用,揭示了整合式创新关键要素驱动关键核心技术突破能力形成的过程机制,进一步拓展了整合式创新理论在关键核心技术领域的应用[24-26],为本土创新理论深化与传播作出贡献。

(三)实践启示

第一,对我国大国重器领域后发企业而言,首先要构建机会窗口识别平台,利用人工智能技术,构建具备信息收集、分析、决策等功能的机会窗口识别平台,提高后发企业把握前沿技术、国产化替代需求、制度型市场等独特机会窗口的能力。其次要实施整合式创新,高度重视战略引领作用,从企业全局出发,统筹开放、协同与全要素保障。最后要完善关键核心能力培育机制,既要做好企业技术创新能力监测与预警,又要提高企业资源组织能力评估与优化。

第二,对政府而言,首先要加强国家重大战略牵引和顶层设计,加大大国重器领域的基础研究投入,引导企业、高校、科研院所组建创新联合体,鼓励具备条件的企业开展面向工程应用的基础研究。其次要建立创新容错和激励机制,组织战略科技力量、行业协会等科学评估并研判复杂产品领域可能出现的创新风险,明确创新失败的政策边界和免责程序,引导企业做好风险应对预案,努力做到“鼓励试错但不浪费资源”。最后要完善政策反馈机制,通过研发补贴、税收优惠、项目奖励等政策工具组合,降低后发企业创新成本,引导企业加快国产化替代。

参考文献:

[1]PARK T, JI I. Evidence of latecomers' catch-up in CoPS industries: a systematic review [J]. Technology analysis & strategic management, 2020, 32(8): 968-983.

[2]郭艳婷,梅亮. 复杂产品系统追赶:基于“内容—过程—情境”的研究述评[J]. 南开管理评论,2025,28(2):4-15.

[3]武建龙,李粉,鲍萌萌. 大国重器如何实现关键核心技术突破?:基于创新生态系统的适应性演进[J]. 科学学研究,2025,43(11):2261-2272.

[4]赵长轶,许康,杨草园,等. 上善若水:大国重器关键核心技术突破的组织边界演化研究[J]. 南开管理评论,2025,28(1):65-77.

[5]郭波武,成琼文,王梦莹,等. 参与国际技术标准制定如何推动智能制造企业关键核心技术突破:基于中车株洲

所“中国芯”突破的案例研究[J]. 南开管理评论,2025,28(9):28-40.
[6]郑刚,朱国浩,邬爱其,等. 专精特新企业产学研知识共创与工艺类关键核心技术突破:基于隶属集团型企业中集圣达因的案例研究[J]. 管理世界,2025,41(4):193-218.
[7]吴晓波,付亚男,吴东,等. 后发企业如何从追赶到超越?:基于机会窗口视角的双案例纵向对比分析[J]. 管理世界,2019,35(2):151-167.
[8]KWA K, YOON H. Unpacking transnational industry legitimacy dynamics, windows of opportunity, and latecomers' catch-up in complex product systems[J]. Research policy, 2020,49(4):103954-103954.
[9]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]. 科学学研究,2023,41(2):221-229.
[10]江鸿,吕铁. 政企能力共演化与复杂产品系统集成能力提升:中国高速列车产业技术追赶的纵向案例研究[J]. 管理世界,2019,35(5):106-125,199.
[11]吴晓波,林福鑫,邵贻玥,等. 关键用户驱动的复杂产品系统创新:以中国盾构机的超越追赶为例[J]. 科研管理,2025,46(5):44-54.
[12]陈劲,侯二秀,谢雨轩,等. “大国重器”领军制造企业主导的双链融合演化过程与机制研究:基于中车株洲所的案例研究[J]. 中国软科学,2025,(6):154-165.
[13]陈劲. 整合式创新:新时代创新范式探索[M]. 北京:科学出版社,2021:79-81.
[14]杨仲基,李新,武建龙. 复杂产品系统后发追赶驱动因素研究:基于程序化扎根与系统动力学融合方法[J]. 科技进步与对策,2025,42(1):49-59.
[15]魏江,吴光汉. 提高自主技术创新能力的途径选择[J]. 科研管理,1998(3):38-42.
[16]GHOLZ E,JAMES A D,SPELLER T H. The second face of systems integration:an empirical analysis of supply chains to complex product systems[J]. Research policy,2018,47(8):1478-1494.
[17]SIRMON D G,HITT M A,IRELAND R D,et al. Resource orchestration to create competitive advantage:breadth,depth, and life cycle effects[J]. Journal of management,2011,37(5):1390-1412.
[18]张璐,王岩,苏敬勤,等. 资源基础理论:发展脉络、知识框架与展望[J]. 南开管理评论,2023,26(4):246-258.
[19]LEE K,MALERBA F. 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.
[20]SHIN J S. Dynamic catch-up strategy, capability expansion and changing windows of opportunity in the memory industry[J]. Research policy,2017,2(46):406-416.
[21]王宏起,武建龙,杨仲基,等. 综合优势理论方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2024:162-165.
[22]张羽飞,张树满,刘兵. 产学研深度融合影响领军企业关键核心技术突破能力的理论分析与实证检验[J]. 管理学报,2024,21(4):568-576.
[23]朱雪春,张曦婷. 创新联合体企业知识共创的多主体建模仿真研究[J]. 科技管理学报,2025,27(1):36-47.
[24]尹西明,陈劲,海本禄. 新竞争环境下企业如何加快颠覆性技术突破?:基于整合式创新的理论视角[J]. 天津社会科学,2019(5):112-118.
[25]吴欣桐,梅亮,陈劲. 建构“整合式创新”:来自中国高铁的启示[J]. 科学学与科学技术管理,2020,41(1):66-82.
[26]杜丹丽,赵丹,简萧婕. 整合式创新范式下后发企业如何实现追赶性成长:基于华为纵向案例研究[J]. 中国科技论坛,2022(2):115-124.
[27]彭新敏,史慧敏,朱顺林. 机会窗口、双元战略与后发企业技术追赶[J]. 科学学研究,2020,38(12):2220-2227,2257.
[28]EISENHARDT K M,GRAEBNER M E. Theory building from cases:opportunities and challenges[J]. Academy of management journal,2007,1(50):25-32.
[29]武建龙,董阔,杨仲基,等. 场景驱动企业颠覆性创新的作用机制研究:基于创新生态系统视角的双案例分析[J]. 中国软科学,2024,(10):164-174.
[30]吴晓波,余璐,雷李楠. 超越追赶:范式转变期的创新战略[J]. 管理工程学报,2020,34(1):1-8.
[31]许庆瑞,郑刚,喻子达,等. 全面创新管理(TIM):企业创新管理的新趋势:基于海尔集团的案例研究[J]. 科研管理,2003(5):1-7.

(本文责编:润　泽)