

主要工业国家先进制造技术优势 动态分布与政策性成因 ——基于技术生命周期的分析

李 林, 杨锋林, 何建洪
(重庆邮电大学 经济管理学院, 重庆 400065)

摘 要:先进制造技术是支撑全球第四次工业革命的重要基石。基于技术生命周期理论,运用 Logistic 模型与 RTA 指数对世界主要工业国家先进制造技术创新的时间序列、子领域空间分布情况进行了分析。研究发现,无论是从整体的时间序列,还是特定的国家看,先进制造技术子领域创新发展并不均衡,这种不均衡可能是各国政府直接或间接干预的结果;从技术生命周期趋势看,2017—2023 是全球先进制造技术转型发展的一个重要时期,多数技术领域都存在创新突破的机会窗口。同时探讨美国、日本、德国等工业强国获取先进制造技术优势的原因,并对中国发展先进制造技术提出政策启示。

关键词:先进制造技术;技术生命周期;技术优势指数;动态分布

中图分类号:F270 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2022)02-0044-12

Dynamic Distribution and Policy Causes of the Advantages of Advanced Manufacturing Technology in Major Industrial Countries: Analysis Based on Technology Life Cycle

LI Lin, YANG Fenglin, HE Jianhong
(School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and
Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Advanced Manufacturing Technology is the cornerstone of the Global Information Revolution. Based on the theory of Technology Life Cycle, this paper analyzes the time series and sub-domain spatial distribution of advanced manufacturing technology innovation in major industrial countries by using Logistic model and RTA index. It is found that the development of innovation in the Subfield of advanced manufacturing technology is not balanced either in the whole time series or in specific countries, which may be the result of direct or indirect intervention by governments. According to the trend of technology life cycle, 2017 – 2023 is an important period of transformation and development of global advanced manufacturing technology. At the same time, the paper briefly discusses the reasons why the United States, Japan, Germany and other industrial powers obtain the advantage of advanced manufacturing technology, and the Policy Enlightenment for China to develop advanced manufacturing technology. Advanced Manufacturing Technology is the cornerstone of the Global Information Revolution. Based on the theory of Technology Life Cycle, this paper analyzes

收稿日期:2021-08-28 修回日期:2022-01-22

基金项目:国家社会科学基金面上项目“后追赶阶段我国企业面向先进制造业的技术赶超研究”(18BGL039)。

作者简介:李林(1969—),男,重庆邮电大学教授,博士,研究方向为技术经济与管理。通信作者:何建洪。

the time series and sub-domain spatial distribution of advanced manufacturing technology innovation in major industrial countries by using Logistic model and RTA index. It is found that the development of innovation in the Subfield of advanced manufacturing technology is not balanced either in the whole time series or in specific countries, which may be the result of direct or indirect intervention by governments According to the trend of technology life cycle, 2017 – 2023 is an important period of transformation and development of global advanced manufacturing technology. At the same time, the paper briefly discusses the reasons why the United States, Japan, Germany and other industrial powers obtain the advantage of advanced manufacturing technology, and the Policy Enlightenment for China to develop advanced manufacturing technology.

Key words: advanced manufacturing technology; technology life cycle; technology advantage index; distribution

先进制造技术注重经济效益与技术的结合,通过柔性生产、灵活生产、产品差异化、注重效率和质量,提高企业应对市场的能力和自主创新能力,具有优良的产品质量、高技术含量、低资源消耗、少环境污染、良好的经济效益等特点,为客户提供更加人性化的服务。通过发展先进制造技术和新兴产业战略转型,改造传统资源密集型和劳动密集型产业,开辟科技含量高、资源消耗低、环境污染少的新型工业化道路,已成为促进高新技术发展、促进经济发展、满足人民日益增长的需求的主要技术支撑。在世界迈向第四次工业革命的征程中,先进制造技术承载着技术创新与效率收敛的重大期待,并在全球制造业变革与经济发展过程中对于提高产品制造质量、降低交易成本有着重要作用,承担着重塑国家制造系统竞争力的重大责任^[1],因此引发世界主要经济体决策者的高度关注。当前,中国正着力推进 2035 年实现社会主义现代化的战略安排,进入创新型国家前列是社会主义现代化的战略目标,突破关键核心技术是进入创新型国家前列的根本要求,加快发展先进制造技术是关键核心技术攻关的重要行动。美国、日本、德国等国先后针对先进制造技术的发展也提出国家层面的战略规划,强有力地推动了国家在先进制造技术的特定领域获取领先优势。但从先进制造技术发展的历史周期及当前的子领域分布看,并不存在某一国家在先进制造技术全领域或全周期均取得领先优势的局面,这与全球主要经济体在工业发展、经济总量中呈现出的序列性特征截然不同。这一现象可能与先进制造技术周期化演进中存在的高不确定性及较为频繁的突变性有关,也可能与不同国家在子技术领

域中的战略锚定及资源投入有关,但总体上并未表现出显著的规则性。因此,探讨、分析先进制造技术周期性演变及不同经济体在不同子领域中的分布形态,进而推测造成这种形态的可能原因成为当前研究者关注的热点问题。

一、文献综述

先进制造技术涉及的学科门类众多、技术内容广泛,研究者对其应用层次的分类展开了研究和总结。Thomas 等(2012)^[2]认为先进制造技术是一系列具有复杂功能的制造技术,并将其分为信息技术(IT)、产品设计/工程技术(EI)和生产技术(PI)三大类。除了对先进制造技术进行分类总结,现有研究聚焦于 3 个方面:一是先进制造技术的属性定义,如 Harris 等(2020)^[3]从技术维度出发,认为先进制造技术因计算机、微电子、信息与管理学科的融合发展打破制造技术的孤立边界;从日益严峻的环境问题出发,Altuntas 等(2018)^[4]认为先进制造技术为社会带来的是循环经济“再利用”的高级形式,满足资源节约型、环境友好型社会的建设要求。正是因为先进制造技术具有的多元知识集成、全流程动态管理以及可持续发展等特征,帮助企业在有限资源的争夺中获取竞争优势,所以其发展得到工业化国家的积极响应。二是先进制造技术应用的组织行为探寻,如在组织结构方面,Ghani 等(2000)^[5]提出因为先进制造技术的集成性特点,要求产品计划和执行的集成度高、纵向与横向合作紧密,所以灵活、具有高度适应性、分权决策的有机型组织结构更有利于提高先进制造技术的绩效水平。三是先进制造技术的发展趋势分析,如周佳军等(2015)^[6]强调实现网络化制造、服务化制造、智能制造是先进制造技

术动态化演进的方向;Ghobakhloo 等(2018)^[7]通过运用先进制造技术企业的数据结构模型分析,发现信息密集型的精益制造与敏捷制造是先进制造技术的着力应用点;Ellingsen 等(2019)^[8]考察了先进制造技术发展在大数据、安全可靠、模拟可视化、智能制造场景中的驱动力与挑战;在智能化作为中国制造业发展的外延特征情境下^[9],吕文晶等(2019)^[10]提出工业互联网是中国制造业智能化转型的核心,因此“互联网+”与先进制造技术的深度融合是必然趋势。

总体而言,以上研究将先进制造技术视为一个整体,给出了科学技术、社会经济、可持续发展维度下的属性定义,以及实际应用中适合技术发展的组织行为规律探究与智能化背景下先进制造技术发展趋势。然而,先进制造技术中存在系列相对独立的子领域,这些子领域在一个长周期中并不是同步发展^[11]。并且在技术发展中,国家力量相较于企业行为规范而言占据更为重要的位置。因此,如何解析先进制造技术的子领域结构,进而解析不同子领域生命周期的交错演进,分析不同国家在不同子领域中的技术动态优势分布,以及技术优势的政策性成因是值得进一步探讨的问题。基于此,本文以先进制造技术子领域的界定为切入点,通过对子领域生命周期的解析展现主要工业国家的子领域技术优势分布和生命周期演变现实形态,探寻获取技术优势国家的政策成因,从而为我国缩小与工业强国的技术差距、实现技术追赶提供参考。

二、先进制造技术优势分析的研究设计

(一)研究方法

(1) Logistic 模型

对于先进制造技术的生命周期,本文将借助 Logistic 模型进行分析。技术生命周期能够直观绘制技术发展过程中创新速率与时间变化的关系,即从技术萌芽期、成长期、成熟期、衰退期的演进中,伴随着技术不确定性、市场接受度、主导设计形成、系统刚性等要素的交替影响,技术创新速率经历由缓慢上升到加速上升再逐渐下降的过程^[12-15],通常使用 S 曲线来描绘,尤其是基于 Logistic 模型的 S 曲线模型^[16]。本文中先进制造技术生命周期的

Logistic 模型为:

$$Y(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_m)}} \quad (1)$$

在式(1)中,因变量 Y 代表技术累计效用值,用专利授权量表示,涉及 3 个参数为 K 、 r 、 t_m 。其中, K 为饱和值,即技术累计效用的极限值; r 为技术增长速度,通常以技术累计效用值从 10% K 到 90% K 所经历的时间即成长时间来表示; t_m 为反曲点,即技术生命周期中成熟期开始的时间。根据 Logistic 模型,技术累计效用值达到 1%、10% K 、50% K 、90% K 的时点分别代表着萌芽期、成长期、成熟期、衰退期的开始。本文运用美国洛克菲勒大学开发的 Loglet Lab 4.0 软件作为运算工具,该软件采用迭代法进行饱和值、成长时间以及反曲点的参数估计,运用 Bootstrap 方法确定参数的置信区间与标准误差,较为准确地推断技术生命周期各阶段的分界点^[17]。由于技术发展到一定阶段后,持续性技术优化无法满足周围环境的发展要求,将会出现性能更加优越的颠覆性技术以取代旧技术,因而在时间序列的前进下,新旧技术交替变化使得技术领域存在多重 S 曲线的情形。先进制造技术从提出至今,已经过 40 多年的发展,特别是新一轮工业革命以来,信息化技术的飞速发展使得各领域的颠覆性技术频频提出并且得到市场化应用,此时对先进制造技术子领域的技术生命周期测量用多重 S 曲线更合适。

(2) 显性技术优势指数

对于主要工业国家在先进制造技术各子领域的静态空间分布,本文将以广泛使用的显性技术优势指数(RTA)进行刻画,其计算公式为:

$$RTA_{ijt} = \frac{\left(\frac{P_{ijt}}{\sum_{j=1}^m P_{ijt}} \right)}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n P_{ijt}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ijt}} \right)} \quad (2)$$

在式(2)中, P_{ijt} 表示国 j 技术领域 i 在 t 时期的专利授权量, $P_{ijt} / \sum_{j=1}^m P_{ijt}$ 表示技术领域 i 国 j 的专利授权量占有比例, $\sum_{i=1}^n P_{ijt} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ijt}$ 表示国 j

所有技术领域在全球专利授权量的占有份额。在利用专利数据测量先进制造技术生命周期后, t 代表先进制造技术发展对应的萌芽期、成长期、成熟期、衰退期, j 代表美国、日本、德国、中国等主要工业国家, i 代表先进制造技术子领域的关键技术。当RTA指数大于1时,说明该国在特定技术领域相对于世界标准具有比较优势,且该数值越大则该国在此领域的比较优势越大;反之,RTA指数小于1,意味着该国在特定技术领域处于技术比较劣势^[18]。

(二)先进制造技术子领域划分

在不同国家、不同发展阶段,先进制造技术有不同的技术内容和结构体系。其中,受到广泛认可的是由美国机械科学研究院会(AMST)提出的体系架构,其包括基础制造技术、单元制造技术和系统集成技术3个层次,反映先进制造技术由基础到单元,再到系统集成的发展过程^[19]。

第一,基础制造技术层注重生产过程的“效”能力。在节约资源、减少浪费的生态理念倡导下,制造业朝向绿色制造发展,因而保障制造系统低耗且清洁的高效生产是制造技术改进的必然方向。作为先进制造技术的核心部分,基础制造技术层强调利用在传统制造技术基础上渐变形成的通用性技术保障机械加工、铸造、锻压、焊接、热处理、表面保护等基础工艺过程绿色、优质的生产,以材料受迫成形工艺技术、超精密加工技术、高速加工技术为代表。第二,新型制造单元技术层关注新兴产业的“新”需求。产业和技术是螺旋式发展,产业需求推动技术发展,技术前进开发出新的产业。因而随着新兴产业与市场需求的交互作用,传统制造技术与电子、信息、新材料、新能源、环境科学、系统工程、现代管理等高新技术的逐渐结合,形成的崭新制造技术所属新型制造单元技术层。以增材制造技术、微纳制造技术、再制造技术、仿生制造技术、工业机器人、数控机床、计算机辅助设计技术等突变型技术为代表的新型制造技术已经取得阶段性成果并实现商业化应用。第三,系统集成技术层强调制造系统的“集”过程。独立的单元制造技术有特定的优势,但是在与其他技术进行关联时期技术效益能够更大化的释放出来。随着移动物联网、云计算、大数据等信息通

信技术的飞速发展,技术创新主体应用信息通信技术以及系统管理技术将独立的单元制造技术进行有效集成。以企业资源计划(ERP)为代表的系统集成技术层,发挥了制造系统最大的综合效益。

结合已有研究对不同国家先进制造技术的重点发展领域的探索以及AMST提出的先进制造技术层次体系结构,本文将先进制造技术分为11类子领域:计算机辅助设计技术、材料受迫成形工艺技术、超精密加工技术、高速加工技术、增材制造技术、微纳制造技术、再制造技术、仿生制造技术、数控机床、工业机器人、企业资源计划。

(三)数据来源

无论是在探讨国家、区域或是企业等主体的创新潜力,或者是对这些主体的技术状况进行描述评价中,基于专利数据的挖掘分析都被视为一种直观且稳健的方法^[20-22]。专利数据含有丰富的技术信息,是反映技术的有效载体,并且专利数据会随着技术发展而呈现出动态性变化,对技术生命周期的测量以及各国技术布局模式的识别是可靠的数据来源。现有研究借助专利数据对特定的技术领域进行了创新发展探析,如Tseng(2011)^[23]等利用专利数据绘制了储存氢技术与燃料电池技术的生命周期,赵莉晓(2012)^[24]通过专利数据研究发现RFID技术处于成长期,傅瑶等(2013)^[25]运用专利数据分析美国制造业主要领域技术发展趋势。

基于此,本文运用德温特创新索引数据库(Derwent Innovations Index, DII)的专利数据对先进制造技术的生命周期演变、世界主要工业国家的子领域分布等特征进行探索。DII收录了全球超过50个专利发布机构索引的高附加值专利信息,是目前世界上最全面的国际专利信息数据库^[26]。本文首先采用DII数据库中1963—2019年全球的专利授权量对先进制造技术生命周期进行测量,然后比较分析美国、日本、德国、中国等主要工业国家的先进制造技术发展现状。在分析中主要关注以下两个层面的信息:一是由《2016全球制造业竞争力指数》报告显示,美国、日本、德国在科技人才、创新政策和基础设施以及制造业物质基础设施等关键驱动因素方面的表现指数位居前列,研究美国、日本、德国等工业强国的先进制造

技术创新实力更具有代表性^[27];二是近年来,中国的科技创新投入规模呈递增趋势、科技创新效率不断攀升^[28],通过与美国、日本、德国等工业强国的先进制造技术发展的比较,可以发现中国在先进制造技术发展中的地位,找出中国与三个工业强国技术之间存在的差距,从而为中国的先进制造技术发展提供借鉴。

根据 11 类先进制造技术领域的技术关键词,运用 DII 数据库的高级检索功能,通过构建表达式得到 1963—2019 年全球在 11 类子技术领域的专利授权数量。检索式以及全球专利授权总量检索结果如表 1 所示。

表 1 先进制造技术检索

先进制造技术	检索式	专利授权总量 /件
计算机辅助设计技术	TS = (“CAD”)	20166
材料受迫成形工艺技术	TS = (“Precision casting” OR “Powder forging” OR “Polymer material injection molding”)	2751
超精密加工技术	TS = (“Ultra-precision” OR “Ultra-precision cutting” OR “Ultra-precision grinding”)	1021
高速加工技术	TS = (“High speed machining” OR “High-speed spindle” OR “Cooling lubricant”)	1555
增材制造技术	TS = (“Additive manufacturing”)	11783
微纳制造技术	TS = (“micro manufacturing” OR “Nano Manufacturing” OR “Lithography process” OR LIGA)	5153
再制造技术	TS = (“green cleaning” OR “remanufacturing” OR “nondestructive disassembly”)	1108
仿生制造技术	TS = (Biomufacturing OR Bioinformatics)	1670
数控机床	TS = (“CNC”)	18113
工业机器人	TS = (“industrial robot”)	16710
企业资源计划	TS = (“ERP”)	2908

三、基于先进制造技术生命周期的实证分析

先进制造技术生命周期的分析能够客观反映不同子技术的周期化演变特征,为此运用 Loglet Lab 4.0 软件对 11 类先进制造技术在 1963—2019 年的专利授权量数据进行 S 曲线拟合。在 S 曲线的多次拟合中发现,某些特定技术领域用多重 S 曲线的拟合效果明显好于单 S 曲线的拟合效果,因而针对特定领域采用多重 S 曲线模型。

(一)单 S 曲线先进制造技术生命周期

拥有单 S 曲线的 8 类先进制造技术生命周期拟合结果如表 2 所示。观察技术萌芽期的起始年

份可知,从 20 世纪 90 年代开始先进制造技术创新产出从几乎空白向较低发展水平过渡,技术研发主要以原理性的基础技术为主,围绕精密制造系统开始展开。经过萌芽期的技术积累以及基本技术问题得到解决,进入成长期的技术子领域,其市场接纳度提高,如超精密技术在精密陀螺仪及高尖端产品的制作中得以采用,仿生制造技术在人工海豚皮舰艇与鲨鱼皮泳衣等仿生制造产品得到市场推广。正是由于技术成长期呈现出创新动力充足、市场需求快速增长的特征,先进制造技术子领域存在较大发展空间。微纳制造技术、高速加工技术、增材制造技术、再制造技术在 2010 年后逐步进入成熟期,随着技术创新主体围绕主导技术“确立”和“应用”,技术适用领域不断拓宽。目前,增材制造技术已实现航空航天、汽车工业、医疗等多领域实现规模化应用;微纳制造技术也已成熟应用于半导体制造工艺、机械微加工、扫描探针显微镜制造。正是由于这四类技术已步入到成熟期,技术性能实现质的飞跃,并在重要的制造业领域实现规模应用,使得产品质量提升进而改进人类生活质量。

(二)双 S 曲线先进制造技术生命周期

计算机辅助设计技术、工业机器人、企业资源计划的技术生命周期拟合结果如表 3 所示。双 S 曲线的存在证明技术领域发展至今经历了新旧技术的交替,在计算机辅助设计技术领域,其发展速度从 0.453 跃升到 0.726,说明该领域新旧技术 S 曲线之间存在技术跳跃。转向工业机器人领域,技术的萌芽从 1975 年开始,经过 20 世纪 80 年代的高速发展,技术性能逐渐趋于极限,已形成的主导技术似乎无法满足 21 世纪新兴工业需求,在此情境下催生出新的替代技术。相较于计算机辅助设计技术、工业机器人应用于可视的成熟制造,企业资源计划(ERP)侧重于无形的现代生产管理探索,强调制造技术与管理技术的跨领域融合,故而技术萌芽较晚、专利产出较少,但是在新旧技术更替演进中,企业资源计划所呈现出的是不同于前者的新旧技术连续性发展。根据专利数据预测,企业资源计划领域正处于新技术的成熟期,技术难题逐个击破的同时也会面临技术发展速度放慢的问题。

表 2 单 S 曲线先进制造技术生命周期拟合结果

先进制造技术	K	t_m	$t_{0.1-0.9}$	r	R^2
材料受迫成形工艺技术	822	2023	23.3	0.186	0.905
超精密加工技术	491	2023	26.0	0.156	0.921
高速加工技术	127	2013	18.7	0.235	0.933
增材制造技术	4750	2017	5.12	0.858	0.999
微纳制造技术	1153	2010	21.9	0.201	0.968
再制造技术	213	2019	26.8	0.164	0.928
仿生制造技术	639	2021	11.9	0.368	0.921
数控机床	14972	2021	9.76	0.450	0.903
先进制造技术	萌芽期	成长期	成熟期	衰退期	目前阶段
材料受迫成形工艺技术	1998—2010	2011—2023	2024—2035	2036—2047	成长期
超精密加工技术	1996—2009	2010—2023	2024—2036	2037—2050	成长期
高速加工技术	1994—2004	2005—2013	2014—2023	2024—2033	成熟期
增材制造技术	1989—2014	2015—2017	2018—2020	2021—2025	成熟期
微纳制造技术	1987—1999	2000—2010	2011—2022	2023—2033	成熟期
再制造技术	1991—2005	2006—2019	2020—2033	2034—2048	成熟期
仿生制造技术	1999—2014	2015—2021	2022—2028	2029—2034	成长期
数控机床	1998—2015	2016—2021	2022—2026	2027—2031	成长期

表 3 双 S 曲线先进制造技术生命周期拟合结果

S 曲线	技术 生命周期	计算机辅助 设计技术	工业机器人	企业资源计划
第一条 S 曲线	R^2	0.910	0.958	0.959
	K	655	332	132
	t_m	1994	1984	2003
	$t_{0.1-0.9}$	9.69	6.83	7.34
	r	0.453	0.644	0.599
	萌芽期	1984—1989	1975—1979	1995—1999
	成长期	1990—1994	1980—1984	2000—2003
	成熟期	1995—1999	1984—1989	2004—2007
	衰退期	2000—2013	1990—2010	2008—2011
第二条 S 曲线	R^2	0.972	0.993	0.961
	K	1402	3314	498
	t_m	2020	2018	2019
	$t_{0.1-0.9}$	6.05	15	7.69
	r	0.726	0.293	0.571
	萌芽期	2004—2017	2006—2014	2012—2015
	成长期	2018—2020	2015—2022	2016—2019
	成熟期	2021—2025	2023—2030	2020—2023
	衰退期	2026—2030	2031—2037	2024—2027
	目前阶段	成长期	成长期	成熟期

综合以上分析,11 类先进制造技术的演进特征存在差异,现处于的技术生命周期阶段也不同。超精密加工技术、材料受迫成形工艺技术、仿生制造技术、数控机床、计算机辅助设计技术、工业机器人等先进制造技术正处于成长期,市场需求增加且风险投资涌入创新研究领域,使得技术创新主体充满活力。此外,微纳制造技术、高速加工技术、增材制造技术、再制造技术、企业资源计划等先进制造技术处于成熟期,市场成长与增量创新交互作用将使技术效率达到峰值。

四、主要工业国家先进制造技术发展比较

为了考察主要工业国家先进制造技术发展的差异,本文借助 RTA 指数分析各国在 11 类先进制造技术生命周期各阶段的关键技术优势分布特征。

(一)子技术领域关键技术识别

IPC 分类号是标准化与统一化管理及使用专利文献的国际分类方法,能够反映专利的核心内容和主题^[29],因此通过先进制造技术 IPC 分类号的统计分析可以了解子技术领域研发主体的重点动向,挖掘出该领域发展的关键技术。每项先进制造技术子领域中较高频率的主 IPC 分类号如表 4 所示。

(二)主要工业国家先进制造技术 RTA 指数分布

1. 面向成长期的先进制造技术

面向正处于成长期的 6 类先进制造技术以及刚开始向成熟期发展的再制造技术与企业资源计划,本文构建二维矩阵分析关键技术优势分布特征。横坐标 X 为萌芽期 RTA 指数,衡量先进制造技术发展初期各国的创新强度;纵坐标 Y 为成长期 RTA 指数,衡量先进制造技术跃升发展期各国的创新实力^[30]。以 $[X = 1, Y = 1]$ 为中心点,区域 $[X \geq 1, Y \geq 1]$ 、 $[X < 1, Y \geq 1]$ 、 $[X < 1, Y < 1]$ 、 $[X \geq 1, Y < 1]$ 分别为第一、二、三、四象限。八类先进制造技术中各国关键技术优势分布特征如图 1 所示。

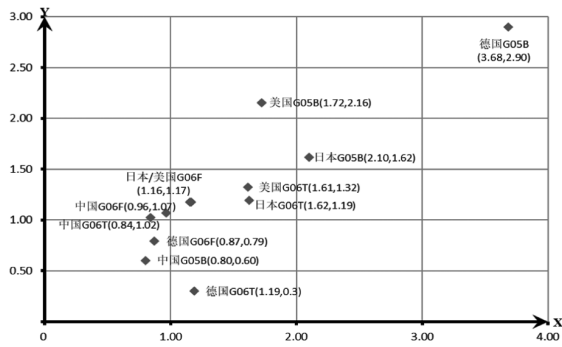
表 4 先进制造技术主 IPC 分类号

先进制造技术	IPC 分类号	占比/%	含义
计算机辅助设计技术	G06F	45.63	电数字数据处理
	G06T	18.54	图像数据处理或产生
	G05B	5.75	控制或调节系统;用于控制或调节系统的监视或测试装置
材料受迫成形工艺技术	B22C	61.52	铸造造型
	B22D	25.00	金属铸造;用相同工艺或设备的其他物质的铸造
	B22F	7.75	金属粉末的加工;由金属粉末制造制品;金属粉末的制造
超精密加工技术	B24B	22.12	用于磨削或抛光的机床、装置或工艺
	B23Q	15.84	金属加工机床的组合或联合
	F16C	3.29	轴;软轴;在挠性护套中传递运动的机械装置
高速加工技术	B23B	14.00	车削;镗削
	B23C	10.00	铣削
	B23Q	27.00	金属加工机床的组合或联合
增材制造技术	B33Y	64.00	增材制造工艺
	B23K	5.00	焊接;用钎焊或焊接方法包覆或镀敷;局部加热切割;用激光束加工
	B29C	7.00	塑料的成型或连接;塑性状态物质的一般成型;已成型产品的后处理
微纳制造技术	G03F	45.00	图纹面的照相制版工艺
	H01L	30.00	半导体器件;其他类目中不包括的电固体器件
再制造技术	G03G	15.37	电记录术;电照相;磁记录
	B23P	11.01	金属的其他加工;组合加工;万能机床
仿生制造技术	C12N	32.04	微生物或酶;其组合物
	C12Q	31.37	包含酶或微生物的测定或检验方法
	G01N	29.85	借助于测定材料的化学或物理性质来测试或分析材料
数控机床	B23Q	36.88	金属加工机床的组合或联合
	G05B	9.64	控制或调节系统;用于控制或调节系统的监视或测试装置
	B24B	6.21	用于磨削或抛光的机床、装置或工艺
工业机器人	B25J	53.00	机械手;装有操纵装置的容器
	G05B	12.00	控制或调节系统;用于控制或调节系统的监视或测试装置
企业资源计划	G06Q	50.07	适用于行政、商业、金融、管理、监督或预测目的的数据处理系统
	G06F	29.14	电数字数据处理
	H04L	3.97	数字信息的传输

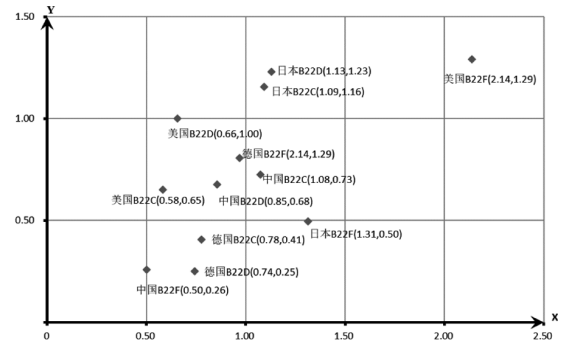
由图 1(1)可知,在计算机辅助设计技术领域各国的技术优势分布存在差异。美国和日本均处于第一象限,德国在 G05B、G06F 领域处于第一象限而在 G06T 领域处于第四象限,中国除了 G05B 领域处于第一象限其他均处于第二象限,表明美国与日本总体上领先优势加强,德国的技术创新动力分配不均衡,中国则在技术快速发展进程中展露出技术追赶的势头。转向图 1(2)发现在材料受迫成形工艺技术领域的第二象限仅有美国进入,反映了在这类技术的成长期很难实现技术创新突破。在二维矩阵中,日本在高频次的关键技术领域处于第一象限,美国除了第四象限其他象限均有涉及,德国集中于第三象限,中国在 B22 领域处于第四象限而其他均在第三象限,显示出日本的核心技术领先优势持续加强,美国的技术发展呈现

不平衡状态,中国与德国的技术创新明显落后。

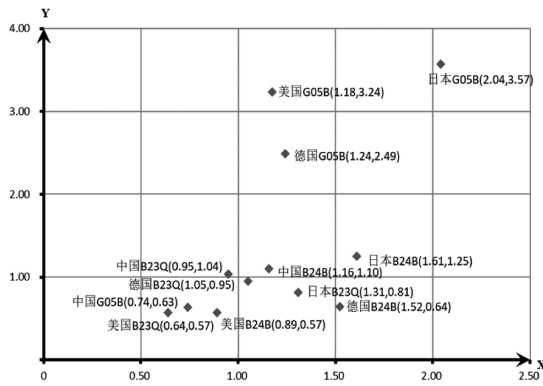
由图 1(3)可知,在数控机床领域就 B23Q 技术主题来看尚未有国家进入第一象限,反映出该领域的核心技术竞争激烈。在二维矩阵中,日本与德国在萌芽期均保持关键技术 RTA 指数大于 1,但是进入成长期部分关键技术的 RTA 指数小于 1,两国未能持续保持强劲的技术创新能力;美国仅有 G05B 处于第一象限,表明部分关键技术领域尚未取得竞争优势;中国在 B23Q 处于第二象限,反映中国在核心技术领域技术创新动力加强。而在超精密加工技术领域,美国、日本、德国在 B23Q 与 F16C 领域均处于第一象限,中国在多数技术领域处于第一象限,表明工业强国在局部关键技术实现持续性领先的同时,中国的技术创新动力也在逐渐加强。



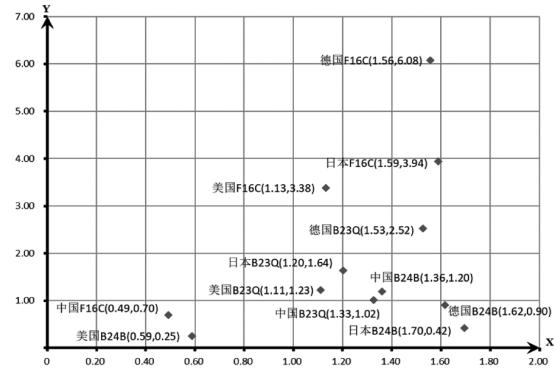
(1) 计算机辅助设计技术



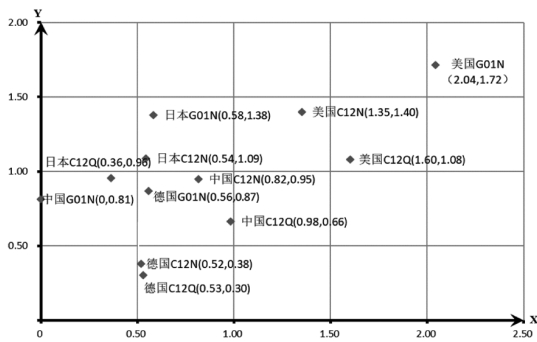
(2) 材料受迫成形工艺技术



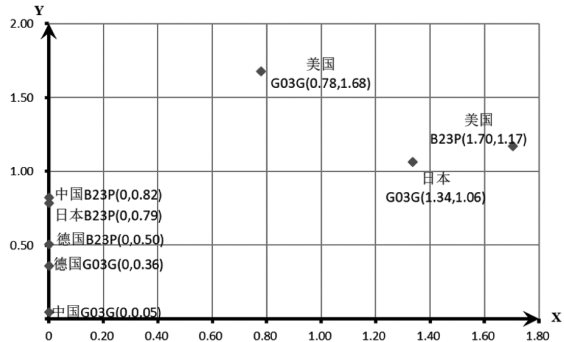
(3) 数控机床



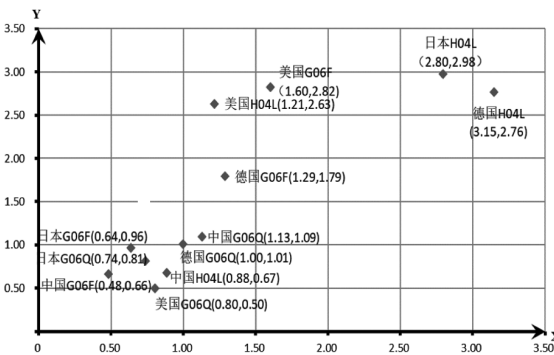
(4) 超精密加工技术



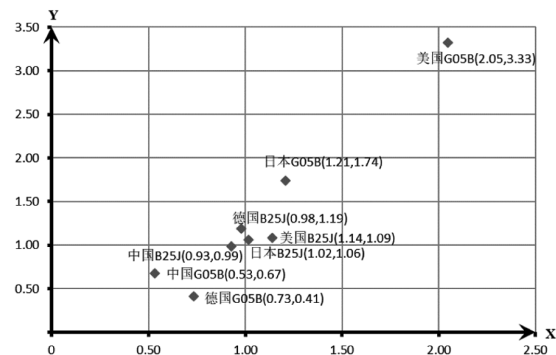
(5) 仿生制造技术



(6) 再制造技术



(7) 企业资源计划



(8) 工业机器人

图1 八类技术领域萌芽期至成长期各国 RTA 指数分布

注:横坐标 X 为萌芽期 RTA 指数,纵坐标 Y 为成长期 RTA 指数。

由图 1(5)、图 1(6)可知,仿生制造技术、再制造技术领域的第四象限均未有国家进入,表明各国在这两类领域的技术创新活动从未松懈。在仿生制造技术领域,第一象限只有美国进入,第二象限只有日本进入,第三象限日本、中国、德国均有进入,如此的技术优势分布显示美国的领先地位不可动摇,日本的创新能力得到了拓展和延伸,德国与中国尚处于技术落后的局面。转向再制造技术领域,可以发现 4 国的技术优势布局更为明晰,美国在 B23P 与 G03G 分别处于第一、二象限,日本在 G03G 处于第一象限、B23P 处于第三象限的左边缘,中国与德国均处于第三象限的左边缘,其揭示了美国在再制造技术发展中的绝对领先地位,日本逐渐关注该领域的技术发展并加强创新能力,而中国与德国的技术创新活动则较晚展开。

由图 1(7)、图 1(8)可知,企业资源计划与工业机器人领域的第二象限与第四象限均没有国家进入,表明各国在这两类领域的技术发展取决于萌芽期的技术能力积累。在企业资源计划领域,德国在关键技术领域均处于第一象限,技术领先优势持续加强;日本仅在 H04L 处于第一象限,其核心技术领域创新动力不足;美国除了 G06Q 在第三象限,其他均在第一象限,而中国的情况与美国相反,表明中国在局部关键技术显现出技术发展生机。在工业机器人领域,美国、日本处于第一象限,中国处于第三象限,德国在两个区域均有涉及,显示美国与日本在该领域的技术领先,德国在局部领域取得技术优势,而中国与这三个国家相比仍有较大差距。

2. 面向成熟期的先进制造技术

面向高速加工技术、增材制造、微纳制造等正处于成熟期发展的先进制造技术,运用雷达图分

析各国在技术生命周期不同阶段的 RTA 指数变化趋势,其中菱形表示萌芽期 RTA 指数,正方形表示成长期 RTA 指数,三角形表示成熟期 RTA 指数,如图 2 所示。

由图 2(1)可知,在高速加工技术领域技术萌芽期,德国在 B23Q 领域的技术创新能力突出,美国在 B23B 及 B23C 领域取得领先优势;由萌芽期向成长期过渡后,美国在 B23C 领域有突破式技术创新优势,德国也在 B23B 及 B23C 领域加快创新研究;步入成熟期,日本与德国的技术实力在各领域都得到提升,两国的竞争愈演愈烈。可以发现美国在前期的技术创新动力充足,但是进入成熟期面临技术发展后劲不足的问题,而中国的技术起步时未投入足够的创新资源参与到竞争中,以至于发展至今仍处于技术落后的局面。

由图 2(2)可知,在增材制造技术的萌芽期,美国的技术创新优势明显,尤其在 B33Y 领域创新动力强劲,德国与日本在 B23K 领域获得先行优势;进入成长期后,德国在保持 B23K 领域先行优势的基础上,开始在 B29C 领域进行技术创新能力拓展并取得竞争优势,相比之下,日本与美国技术创新动力弱化;步入成熟期,各国的技术竞争更为激烈,尤其是中国通过技术能力积累实现 B23K 领域的创新突破。转向微纳制造技术的萌芽期,日本较为全面的开启创新研究并取得领先优势,德国与美国在某些关键技术领域创新成效明显,而中国尚未涉足该技术的创新发展;进入成长期,日本在 G03F 领域、美国在 G03B 领域、德国在 H01L 领域各自取得竞争优势;成熟期开始后,美国与日本的技术优势布局没有太大的改变,而德国始终保持局部领域的技术领先,中国在该领域技术发展与其他国家相比仍有较大差距。

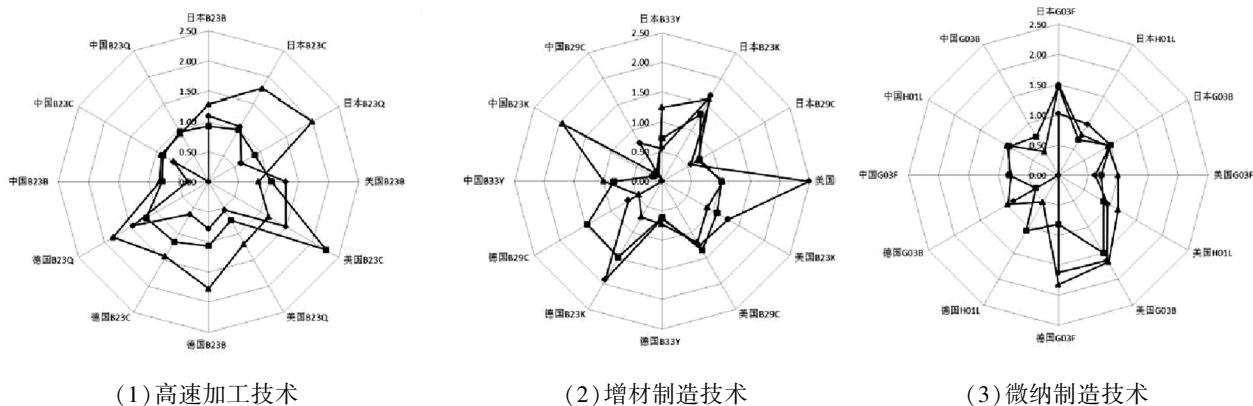


图 2 三类子技术领域萌芽期至成熟期各国 RTA 指数分布

五、国家政策性干预与先进制造技术优势的形成经验

根据主要工业国家先进制造技术发展阶段的 RTA 指数分布,可以发现在特定技术领域,有的国家持续保持技术优势,而另有国家在某一阶段突现其技术优势。探寻这一现象的原因后发现,工业强国所持有先进制造技术优势受益于国家政策性干预,并且不同的国家有不同的表现。

(一)美国——国家实验室

从先进制造技术子领域的周期化演进来看,美国在计算机辅助设计技术、仿生制造技术、工业机器人、增材制造技术的发展中持续保持技术领先优势,这与美国国家实验室的研究贡献密切相关。20 世纪 30 年代至 20 世纪 80 年代,为满足军方对先进技术的需要,美国联邦政府迫切地与科技界建立联系,相继在美国能源部、国防部和国家航天航空局等联邦部位下建立庞大的国家实验室体系^[31]。其中,隶属美国能源部下属的 17 个国家实验室是典型代表,对推动美国先进技术的发展贡献卓越。如先进计算领域,有阿贡实验室、劳伦斯伯利克实验室、橡树岭实验室的鼎力支持;基础能源科学领域拥有阿莫斯实验室、阿贡实验室、布鲁克海文实验室、劳伦斯伯利克实验室、橡树岭实验室、西北太平洋实验室、斯坦福直线加速器中心的雄厚科研实力;生物环境领域依托劳伦斯伯利克实验室与西北太平洋实验室;高能物理领域有费米实验室与斯坦福直线加速器中心的研发贡献^[32]。正是美国联邦政府大力支持这些研发实验室,使得美国在能源创新、计算创新、生物创新、物理创新上取得傲人的成绩。

(二)日本——财政扶植

日本在材料受迫成形工艺技术、数控机床的技术领域发展阶段中持续保持技术领先优势,这与日本政府对科技研发活动的财政扶植密切相关。首先是日本政府直接的科技投入大幅增长,如 20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代的科研经费分别是 20 世纪 60 年代的 25.4 倍和 65.6 倍,并且 1995 年开始,日本科技投入占 GDP 的比重与美国、英国、德国、法国相比均高居第一。其次是直接的研究开发补贴,在 1965 年以前日本主要补助金仅有工矿业重要技术研究开发费一种,而在 1968 年和 1972 年,日本先后建立了促进电子计算机开发费补助金和机械开发费补助金用于改善中小企业技术研发。再者是优惠融资安

排,1968 年日本开发银行设立了“新机械企业化贷款制度”,1970 年又为中小企业设立了由中小企业金融公库实行的“国产技术企业化贷款制度”,为新技术的企业化以及新机械的商品化实验提供低息贷款。对于企业遇到技术瓶颈,日本政府没有袖手旁观,而是大力采用财政措施激励民间研究开发活动,尤其是在机械制造领域的研发活动,使得日本从引进技术转变为自主研发技术,并在特定领域成为全世界领跑者。

(三)德国——产业计划

德国在超精密加工技术、企业资源计划的技术领域发展阶段中持续保持领先优势,在高速加工技术的成熟期突现出本国的技术优势,这与德国出台并实施的制造业计划密切相关。20 世纪 80 年代后,德国面临日本、韩国出众的产品性能与以中国为代表的亚洲低劳动力成本的挑战,因此德国政府在 20 世纪 90 年代开始着手实施制造技术发展计划,对制造业的过快下降进行干预^[33]。如 1995 年出台的《制造技术 2000 框架方案》明确机床结构化技术以及关键零部件设计制造技术研究;1999 年出台的《德国 21 世纪信息社会行动计划》大力发展信息通信技术,

提高制造业科技含量以促进制造业现代化。2006 年颁布的《高科技战略》鼓励信息技术、生物技术、纳米技术和航天技术等领域的科研成果向生产转化;2013 年推出的《保障德国制造业的未来:关于实施“工业 4.0”战略的建议》强调以“互联网+制造业”为核心的信息物理融合系统,倡导智能化、网络化与节能化的新型制造模式^[34]。正是德国没有与日本、亚洲四小龙及中国在自己不擅长的领域竞争,而是朝着制造技术领先的方向安排一系列的产业计划促进技术研发,才在机械产品、电气产品相关的加工技术方面继续保持世界领先的水平。

六、结论与政策启示

先进制造技术发展至今已成为世界各国科技竞争的制高点,无论是在技术生命周期视角下的时间维度还是在子技术领域的空间维度,全球主要工业国家在先进制造技术创新发展中均存在显著的非均衡性特征。本文应用专利数据对全球先进制造技术周期化演进特征、子技术领域生命周期进行探索,采用 RTA 指数比较分析美国、日本、德国、中国等主要工业国家在先进制造技术子领

域不同发展阶段的技术优势分布,进而分析工业强国在特定技术领域取得技术竞争优势的原因。研究发现:先进制造技术不同子领域在周期演进上并不同步,计算机辅助设计技术、工业机器人、企业资源计划等技术领域已经完成第一轮的新旧技术更替,而材料受迫成形工艺技术、超精密加工技术、高速加工技术、增材制造技术、微纳制造技术、再制造技术、仿生制造技术、数控机床等技术领域正处于新技术创新势头强劲的时期,技术发展空间大、创新动力强。从先进制造技术集群来看,2017—2023 年是全球先进制造技术转型发展的一个重要时期,更有可能取得突破性成果。同时,美国、日本、德国等工业强国在大部分先进制造技术子领域竞争优势明显,并且在多数子技术领域竞争优势的持续性十分明显,这种技术竞争优势及可持续性与这些国家长期一贯的政策性支持或干预密不可分。

先进制造技术创新发展在时间、空间上的非均衡性,以及其对政策因素的强依赖性一方面有利于强化发达国家维持、巩固其特定领域特定周期下的技术优势,另一方面也为我国先进制造技术的追赶与创新突破提供了机会窗口。这对于现阶段我国先进制造技术领域相关政策规划制定以及企业技术战略的形成均有着重要启示意义。

第一,在政策层面抓住先进制造部分子技术领域周期阶段转换的机遇期,大力引导创新要素向先进制造关键技术领域集聚。在材料受迫成形工艺技术、仿生制造技术、再制造技术、高速加工技术、微纳制造技术等先进制造技术子领域中,健全社会多渠道投入机制,促进各类创新要素向研发主体聚集,发挥大企业的创新引领作用,支持中小微企业成长为重要创新源泉,推动企业在先进制造技术转型关键期的融通创新。

第二,在先进制造技术部分子领域中构建国家实验室,推动子领域技术领先优势的形成与维持。无论是我国“十四五”规划中将国家实验室视为国家战略科技力量,还是全球主要工业国家通过国家实验室建设获得先进制造技术领先优势的历史经验,均表明国家实验室建设在如先进制造等在内的前沿科技创新的重要意义。因此,我国应根据全球先进制造技术优势结构化分布状况,在超精密加工技术、材料受迫成形工艺技术、仿生制造技术、数控

机床、计算机辅助设计技术、工业机器人等处于成长期的子技术领域中布局国家实验室建设,通过实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目,加快关键核心技术攻关,进而形成并维持我国先进制造技术在这些领域的技术优势与创新效能。

第三,在产业发展规划中加快推进与先进制造相关的战略性新兴产业发展,构建先进制造技术创新的良好生态和集群优势。从部分发达国家经验看,构建一批各具特色、优势互补、结构合理的战略性新兴产业增长引擎是培育新技术的关键途径,也是推动先进制造技术整体优势形成的重要手段。因此,我国要在产业计划中强化与先进制造技术关联的新能源、新材料、高端装备、航空航天、生物信息、绿色环保、新能源汽车、新一代信息技术、海洋装备等新兴产业发展,通过互联网、大数据、人工智能等热点技术同先进制造技术各子领域深度融合,推进先进制造业集群发展,加快先进制造核心技术面向国际前沿的追赶与超越。

第四,围绕先进制造技术体系中追赶空间大、机会窗口明确的子领域,引导企业不断提高研发投入,提升自主创新能力。面向正处于成长期、发达国家技术优势较弱的先进制造子技术领域,积极培育企业的创新意识,引导企业加大对关键新技术和产品的研发投入,重视人才引进和培养,加强政产学研合作,促进企业产品创新升级,从而构建我国先进制造技术面向国际前沿追赶与超越的微观基础。

第五,世界主要工业国家在先进制造技术不同子领域中领先优势的形成应该存在较复杂的机制与情境约束,本文虽然从国家政策支持与干预的视角进行了简要的解释,但对这些机制和情境约束的探讨需要应用更详实的数据和归因分析方法,基于这种归因或实证验证的结果可能会为后发国家的技术追赶提供更具体的策略建议,这既是本文研究的局限,也是在进一步研究中值得继续探讨的重要问题。

参考文献:

- [1] UNGAN M. Advanced manufacturing technologies: a survey research [J]. International journal of advanced research, 2015, 5(8): 76-91.
- [2] THOMAS A, BARTON R. Characterizing SME migration towards advanced manufacturing technologies [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part B-Journal of engineers manufacture, 2012, 226(B4): 745-756.

- [3] HARRIS, LEGGETT, CHRIS. National culture, employee empowerment and advanced manufacturing technology utilization: a study of Nigeria and New Zealand [J]. *Journal of management & organization*, 2020, 26(4): 460-482.
- [4] ALTUNTAS S, CINAR O, KAYNAK S. Relationships among advanced manufacturing technology, innovation, export, and firm performance [J]. *Information sciences*, 2018, 9(47): 1836-1856.
- [5] GHANI K, JAYABALAN V. Advanced manufacturing technology and planned organizational change [J]. *Journal of high technology management research*, 2000, 11(1): 1-18.
- [6] 周佳军, 姚锡凡. 先进制造技术与新工业革命[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(8): 1963-1978.
- [7] GHOBAKHLOO M, AZAR A. Business excellence via advanced manufacturing technology and lean-agile manufacturing [J]. *Journal of manufacturing technology management*, 2018, 1(29): 2-24.
- [8] ELLINGSEN O, AASLAND K. Digitalizing the maritime industry: a case study of technology acquisition and enabling advanced manufacturing technology [J]. *Journal of engineering and technology management*, 2019(54): 12-27.
- [9] 李廉水, 石喜爱, 刘军. 中国制造业 40 年: 智能化进程与展望[J]. *中国软科学*, 2019(1): 1-9.
- [10] 吕文晶, 陈劲, 刘进. 工业互联网的智能制造模式与企业平台建设——基于海尔集团的案例研究[J]. *中国软科学*, 2019(7): 1-13.
- [11] TAYLOR M, TAYLOR A. The technology life cycle: conceptualization and managerial implications [J]. *International journal of production economics*, 2012, 140(1): 541-553.
- [12] FODEN J, BERENDS H. Technology management at Rolls-Royce [J]. *Research-technology management*, 2010, 53(2): 33-42.
- [13] BEVILACQUA M, CIARAPICA F, GIACCHETTA G. Development of a sustainable product lifecycle in manufacturing Firms: a case study [J]. *International journal of production research*, 2007, 45(18/19): 4073-4098.
- [14] KIM B. Managing the transition of technology life cycle [J]. *Technovation*, 2003, 23(5): 371-381.
- [15] ANDERSON P, TUSHMAN M. Technological discontinuities and dominant designs: a cyclical model of technological change [J]. *Administrative science quarterly*, 1990, 35(4): 604-633.
- [16] GAO L, PORTER A, WANG J. Technology life cycle analysis method based on patent documents [J]. *Technological forecasting & social change*, 2013, 80(3): 398-407.
- [17] EFRON B, TIBSHIRANI R. An introduction to the Bootstrap [M]. New York: Chapman and Hall, 1993.
- [18] 官建成, 王刚波. 技术领域优势的国际比较研究[J]. *科学学研究*, 2008(1): 90-97.
- [19] CHEN I, SMALL M. Planning for advanced manufacturing technology—a research framework [J]. *International journal of operations & production management*, 1996, 16(5): 4-10.
- [20] 冯科, 曾德明. 技术融合距离的聚类特征与影响因素——基于大规模专利数据的实证研究[J]. *管理评论*, 2019, 31(8): 97-109.
- [21] 齐绍洲, 张倩, 王班班. 新能源企业创新的市场化激励——基于风险投资和企业专利数据的研究[J]. *中国工业经济*, 2017(12): 95-112.
- [22] 殷存毅, 刘婧玥. 所有制区隔与跨域合作创新——基于 2005—2015 京、沪、深三大城市专利数据分析[J]. *中国软科学*, 2019(1): 82-97.
- [23] TSENG F, HSIEH C, PENG Y. Using patent data to analyze trends and the technological strategies of the amorphous silicon thin-film solar cell industry [J]. *Technological forecasting and social change*, 2011, 78(2): 332-345.
- [24] 赵莉晓. 基于专利分析的 RFID 技术预测和专利战略研究——从技术生命周期角度[J]. *科学学与科学技术管理*, 2012, 33(11): 24-30.
- [25] 傅瑶, 孙玉涛, 刘凤朝. 美国主要技术领域发展轨迹及生命周期研究——基于 S 曲线的分析[J]. *科学学研究*, 2013, 31(2): 209-216.
- [26] 张杰, 刘美佳, 翟东升. 全球 RFID 技术专利计量分析[J]. *情报杂志*, 2013, 32(1): 21-26.
- [27] 李金华. 中国先进制造业技术效率的测度及政策思考[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2017, 17(4): 104-116.
- [28] 王贻芳, 白云翔. 发展国家重大科技基础设施引领国际科技创新[J]. *管理世界*, 2020, 36(5): 172-188.
- [29] 黄鲁成, 石媛嫒, 吴菲菲. 基于专利数据的太阳能电池研发态势及技术构成分析[J]. *情报杂志*, 2015, 34(2): 116-123.
- [30] 李林, 杨锋林, 何建洪. 美、德、日、中先进制造技术优势的比较研究[J]. *情报杂志*, 2020, 39(10): 65-71.
- [31] 聂继凯, 危怀安. 国家实验室建设过程及关键因子作用机理研究——以美国能源部 17 所国家实验室为例[J]. *科学学与科学技术管理*, 2015, 36(10): 50-58.
- [32] 肖小溪, 代涛, 李晓轩. 美国国家实验室的改革动向及启示[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(3): 376-382.
- [33] 杨海洋. 德国制造业优势产生并保持的原因分析[J]. *改革与战略*, 2013, 29(1): 116-121.
- [34] 黄群慧. 中国的工业大国国情与工业强国战略[J]. *中国工业经济*, 2012(3): 5-16.

(本文责编: 辛 城)