大科学的技术创新范式及演化动力分析

张　毅[1],闫　强[1]
(1. 北京邮电大学经济管理学院,北京　100876)

摘　要:以演化动力学视角对主要国家和地区的大科学演化过程进行分析,提出大科学技术创新的主要条件、范式及动力机制。研究发现:外部压力、规模投入、适度聚集、有效组织、基础理论和技术的准备是大科学的高效创新的主要条件;大科学的技术创新存在组合创新、颠覆式创新和需求拉动创新3种主要范式;不同国家和地区的要素禀赋、大科学投入水平、技术创新方式的相互作用,形成美国、中国、欧洲、日本以及原苏联等的演化路径。研究结论进一步深化了大科学的技术创新理论,对中国的大科学建设及新型科技举国体制具有比较重要的实践意义。

关键词:大科学;创新范式;演化动力;大规模创新;科技举国体制
中图分类号:G315　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005－0566(2023)06－0001－25

Analysis of technology innovation paradigm and evolutionary dynamic of big science

ZHANG Yi[1], YAN Qiang[1]
(1. *School of Economics and Management*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*)

Abstract: This paper studies the evolution process of different types of big science from the perspective of evolutionary dynamics, analyzes the internal and external driving forces of technological innovation of big science, and then establishes the innovation paradigm and dynamic mechanism model of big science. It is found that large-scale and intensive resource investment, effective organization, preparation of basic theory and technology, and strong external pressure are the preconditions for efficient innovation of big science; There are three main paradigms in the technological innovation of big science: realizing the scale efficiency of technological innovation through multi-path exploration and systematic organizational division of labor, promoting the emergence of disruptive innovation through fierce collision and full communication in multiple frontier fields, promoting the industrial incubation of new technology and extreme technological demand through a large number of industrial demand; The economic development level of different countries and regions, the investment level and innovation mode of big science and the promotion of big science to industry and economy have evolved into different models of big science and industrial economic development. Among them, Silicon Valley is a model of common prosperity of big science, technology and industry. The research conclusion further deepens the innovation theory of big science, and has important practical significance for China's big science construction and the national system of new science and technology.

Key words: big science; innovation paradigm; evolutionary dynamic; large scale innovation; national system of science and technology

收稿日期:2022-11-23　　**修回日期**:2023-05-15
基金项目:国家社会科学基金重点项目(17AGL026)。
作者简介:张毅(1978—),男,江苏徐州人,北京邮电大学经济管理学院博士生,研究方向为创新管理。通信作者:闫强。

大科学对于提升国家整体科技实力、突破关键核心技术、保障国家战略安全以及经济的可持续发展都具有重要意义[1-4]。自 20 世纪 40 年代以来,曼哈顿计划、雷达工程、阿波罗计划等系列大科学的成功为美国取得巨大的战略优势,推动美国科学研究和大学快速崛起,催生核能、宇航、卫星通信、计算机等一系列技术和产业,孵化一批以硅谷为代表的高科技创新中心,为美国的长期繁荣奠定了坚实科技基础[5-6]。中国的大科学建设也由两弹一星向太空探索、粒子物理、生物、气候变化等领域全面展开,探索并形成了具有中国特色的解决重大核心技术的科技举国体制和方法[3-4,7]。同时,由于大科学投入巨大,对经济社会也存在极高的成本和不确定性。1994 年,欧洲核子研究中心(CERN)开展大型强子对撞机项目,涉及 250 多个研究所和企业以及 2 300 多名物理学家和工程师[8];美国耗资上百亿美元的攻克癌症计划、挑战者号航天飞机以及日本高清晰模拟电视系统、第五代计算机等项目均由于不同原因宣告失败;原苏联在核物理及航空航天等领域大量投入,虽然取得了战略和科技优势,但也造成原苏联经济结构严重失衡,并最终导致经济和社会的崩溃[9]。可见,大科学建设同时具有高投入、高收益和高风险的特点,如何充分发挥大科学的技术创新优势,解决关系国家战略和经济发展的关键核心技术,并尽量降低和避免大科学的风险和不足,对于新型科技创新举国体制建设至关重要。

Price[10]提出大科学的规模扩张以及知识的指数增长以来,大科学技术创新就一直备受关注。目前对于大科学技术创新的研究主要从技术创新、组织模式、创新生态等方面展开:技术创新研究主要分析大科学对颠覆式技术突破的加速[11-12]、技术创新的规模增长和扩散[6,13-14]以及关键核心技术的后发追赶[12,15],并通过大科学的投入产出分析大科学的技术创新与转化[16-17],但对于大科学中创新要素的相互作用及创新机制缺少分析。组织模式研究通过不同组织形式的案例研究,以三螺旋理论分析政府、大学、企业等不同主体的合作与互动,从而实现知识的创造、转化和应用[18],但三螺旋理论主要通过美国硅谷等区域产学研合作的研究而提出,对于科技水平较低的后发经济体缺乏解释力。可见,组织模式理论对于大科学技术创新研究由科学和技术等创新要素分析深入到组织层面,但仍然没有解释大科学创新的组织动力机制。创新生态研究以生态演化的理论视角,分析科研机构、产业、市场等要素和主体组成的网络系统及其演化,并提出大科学推动形成类似硅谷的产学研共同繁荣的生态体系[6,12,19-20]。创新生态通过不同创新要素和主体之间的关系研究,进一步深化了技术创新和组织模式研究,但也没有明确大科学的创新要素相互作用以及大科学的技术创新与产业孵化机制[6],尤其是大科学技术创新的规模效率、颠覆式创新以及对产业孵化和升级的动力机制,因而很难解释类似硅谷的产学研繁荣以及其他国家和地区大科学的不同演化路径,仍然需要对大科学的创新要素、组织模式、外部资源之间的动力机制进行系统性分析。本文以演化动力学视角,通过对主要国家和地区大科学演化过程的对比分析,提出大科学技术创新的主要条件以及范式,构建大科学技术创新的系统动力机制,进一步完善大科学的技术创新理论,对中国大科学建设及高水平科技创新具有重要的实践意义。

一、文献回顾

(一)大科学的概念与内涵

大科学概念最初主要用来描述曼哈顿计划等工程的规模庞大、投入巨大、人员众多,以及科学研究的工业化趋势并以知识指数规律增长[10],但对于大科学的内涵并没有明确的界定,大科学的概念被广泛用在从核武器研究、太空计划、粒子加速器、人类基因组计划等生物基因工程、天文望远镜、大型产业计划等系列大规模研究项目、基础设施以及产业计划[2,7,21-22]。聂荣臻元帅在两弹一星等战略工程研制过程中开创了中国大科学的现代组织管理,并提出大规模科学技术工程的概念;钱学森院士进一步从研制目的和系统复杂性等方面阐释大规模科学技术工程的内涵,提出大规模科学技术工程对国家安全和国际地位的重大影响[23-24]。从大科学的演化历史看,大科学在二战及冷战期间的高能物理以及太空探索项目主要为了战略作用,冷战结束后转向高新材料、分子生物、生命科学等前沿创新领域[25];从大科学的功能

与目的看,美国与原苏联主要为了战略竞争[9,26],欧洲、日本、中国主要为了科学探索和产业技术创新[6,21]。可见,从系统工程的角度看大规模科学技术与大科学的内涵基本相同,大科学主要是通过大规模工业化的科学研究实现国家战略、科学探索、产业发展的大型科技创新工程。本文将采用该概念内涵对大科学界定,并分为战略型、科学型与产业型3种类型,进而对不同类型大科学对比分析。

(二)大科学的技术创新

大科学的技术创新主要从技术创新、组织模式和创新生态3个理论视角展开。①技术创新视角主要是对大科学的不同技术创新模式进行研究。大科学通过创新资源聚集快速提高技术创新水平,加速核武器、雷达、航空航天、半导体制造等核心技术的突破[2,7,11-12,21],以及通过关键核心技术创新过程中相关技术的大量创新,形成大科学的非核心技术及衍生技术的创新与扩散[13]。在后发经济体的技术追赶情境下,大科学还成为计算机、半导体、高铁技术等产业技术的主要追赶模式[7,12,21]。可见,大科学既加快重大创新的突破,又由于大量技术的组合[27],在创新过程中涌现大量衍生技术。②组织模式视角主要是通过对美国的大学与军工复合体[3,11,26]、日本的产学研政[21]、原苏联的国家集中式科研体系[9,21]、中国的科技举国体制[7,15,28]、欧洲的大科学国际合作[22,29]等案例研究,进一步从组织层面分析大科学技术创新的大规模组织机制,提出大科学的有效组织促进不同创新主体之间的频繁交流、分工合作和知识扩散,从而推动颠覆式创新的产生以及提高整体协同性与创新效率,并进一步提出三螺旋理论,认为产学研的不同合作创新主体之间的互动,实现了科学、技术与创新的转化与应用[18],但组织视角仍然没有对主体之间的动力机制进行分析。③创新生态视角主要是以生态演化视角对大科学创新的不同要素和主体构成的复杂系统进行分析。由于大科学具有显著的组织复杂性和技术复杂性[19],同时具有集成性、开放性和协同性,形成不同创新主体的创新生态[20]。黄振羽[6]进一步提出美国大科学的大量聚集催生了产学研共同繁荣的生态体系,并从不同主体之间的互惠关系分析产学研的合作创新,但仍然无法解释整个生态繁荣的机制。可见,目前研究对于技术创新的内在机制探讨由创新要素向组织模式以及创新生态逐步深化,大科学通过大规模资源投入和有效组织,加快科学向技术的转化和核心技术突破的速度,并带动产学研的共同进步和生态繁荣,但对于大科学中大规模的创新要素的相互作用以及技术创新的产生机制还缺乏深入分析。

(三)大科学的动力机制

除了对大科学技术创新的创新模式、组织模式以及创新生态等视角的研究,目前大科学的动力机制研究主要分析大科学技术创新的经济社会等外部影响:美国大科学推动产学研相互促进和共同繁荣,带动了硅谷及波士顿128公路附近地区高科技产业的繁荣[6,14];日本半导体企业的联合创新计划促进日本半导体产业世界领先的地位[21],并在九州岛地区形成半导体制造、材料和设备产业的聚集[30];中国的高铁企业通过产学研的合作创新,加快核心技术的后发追赶,获得世界领先的竞争优势[12]。目前,多数研究认为大科学通过资源的密集投入提高创新效率[3],然而大科学的巨大投入也给国家和社会带来巨大的负担和风险,美国超导超级对撞机由于不断增长的巨额费用而不得不取消[26],日本高清电视、超级计算机等大工程投入最终失败[30];原苏联由于在核科学和航天技术的巨大投入,虽然在相关领域形成较强的竞争力,但对经济和社会造成沉重负担[9]。因而,大科学的技术创新能有效促进产业升级和经济增长,同时其大规模投入也对经济社会产生重大影响,过度投资甚至抑制了经济社会的健康发展,但目前研究缺少大科学的技术创新与产业升级和经济发展之间影响机制的深入分析,即通过大科学技术创新的内外部因素的交互作用的系统性研究,进而分析大科学与产业经济的整体演化机制。

二、研究设计

(一)研究方法

以演化动力学视角,结合访谈和二手数据分析的方法,对主要国家和地区的大科学演化过程进行对比研究。由于大科学具有超大规模、复杂性和整体性,综合访谈及各种公开数据分析可以

形成对研究对象的全面和系统的认识,并以量化数据对构念进行测度,提高质性研究的可信度[31];采用半结构化访谈对部分大科学工程情境恢复和补充,并对各方材料进行“三角验证”[32];采用演化动力学对大科学技术创新进行结构化分析,逐步形成大科学技术创新的系统动力理论,进一步提高了质性研究的严谨性[33],并对建立的大科学演化动力模型进行实证检验和仿真分析。

(二)数据收集

主要数据来自访谈以及各种二手数据,共收集不同领域的典型大科学样本 397 个,全面和系统构建了大科学技术创新的数据库。如表 1 所示,一手资料包括中国科学院高能物理所、中国信息通信研究院、国际商业公司(IBM)、诺基亚(原贝尔实验室)、华为等大型研究机构和企业共计 12 位研究人员的半结构化访谈;二手数据包括美国、中国、欧盟(英、法、德)、日本、原苏联(俄罗斯)①等主要国家和地区的大科学建设及管理机构的公开资料,主要学术期刊关于大科学的研究文献,以及典型大科学的研究专著。

表 1　主要数据来源说明

资料类型	资料来源	内容
访谈	高能物理所(2 名)、信息通信研究院(3 名)、IBM(2 名)、诺基亚(2 名)、华为(3 名)共 12 位研究人员	2019—2022 年,对两弹一星、SAGE、中国 3G 等重要项目研发过程进行情景恢复和相关二手数据核实
公开资料	美国:能源部、国家航空航天局、国防部、国防高科技研究局、国家科学基金会、国家卫生研究院、海洋大气管理局、地质调查局;中国:科技部、教育部、国家发展改革委、国家自然科学基金委;欧洲:科研基础设施战略论坛、欧洲宇航局;英、法、德主要科技管理部门;原苏联(俄罗斯):教育科学部、科学院、国家原子能集团公司;日本:文部科学省、经济产业省	主要国家和地区的典型重大工程建设的数据及文件,包括曼哈顿计划、MIT 雷达、人造卫星、载人航天、国际空间站、载人登月、两弹一星、集成电路、超级计算机、大型强子对撞机、粒子加速器、散列中子源、伽利略计划、核聚变计划、卫星探测计划、望远镜计划、石墨烯、人类基因组、人脑计划、全球气候变化等不同领域的大科学工程,以及各国家和地区的大型科技计划
学术文献	知网(关键字:大科学、大规模创新、重大工程)	主要中文核心期刊关于大科学的研究文献 135 篇,检索截止时间为 2022 年 12 月 17 日
	WOS(关键字:big science, large scale innovation, mega project)	主要外文学术期刊关于大科学的研究文献 271 篇,检索截止时间为 2022 年 12 月 17 日
专著	关于典型大科学工程及研究机构的专著共 225 本,包括曼哈顿、MIT 雷达、阿波罗登月、两弹一星等典型大科学工程以及林肯实验室、贝尔实验室、卡文迪什实验室、理化学研究所等研究机构的相关研究	

(三)数据处理

通过对主要国家和地区的大科学数据梳理,对比分析不同国家和地区大科学的发展和演化过程,进一步分析不同类型大科学的演化路径、技术创新、扩散路径以及对产业和经济发展的影响,如图 1 所示。逐步浮现大科学技术创新的系统动力机制、主要条件及创新范式,其中理论的发现和形成,与数据的收集和分析不断迭代直至理论饱和。

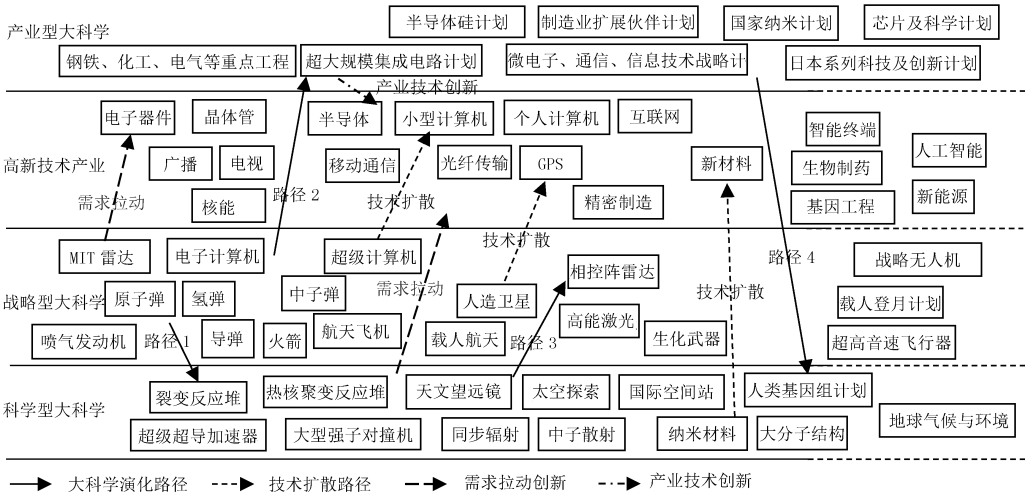


图 1　大科学的发展与演化

① 文中原苏联为 1922—1991 年的苏联,俄罗斯为 1991 年至今的俄罗斯,原苏联(俄罗斯)为 1922—1991 年的苏联及 1991 年至今的原苏联解体后主体部分俄罗斯两部分。

三、全球大科学的发展与演化

（一）美国的大科学发展与演化

美国大科学经历二战期间、冷战期间以及冷战结束以后3个阶段[4]，如表2所示。①二战期间。美国通过曼哈顿计划和雷达等大科学计划赢得了重要的战略优势，促进了科学、产业和政府的大规模合作，加快了前沿科学向战略技术的转化。大科学的巨大成功使科学研究获得美国政府和社会的巨大支持，大科学象征着技术实力、军事实力和社会文化利益，为进一步获得战略优势，美国大规模组建国家实验室，大科学由军事技术开发向粒子物理等科学领域扩展，劳伦斯等国家实验室获取政府资金建造规模空前的加速器[26]。②冷战期间。美国全面开展粒子物理、空间技术等领域的系列大科学研究，国家实验室和大型研究设施快速增加，联邦资助研究发展中心（FFRDC）数量在1969年高达74个，推出大型加速器、人造卫星、载人航天、阿波罗登月等系列计划。大科学不计成本的投入带动了硅谷及波士顿128公路附近地区高科技产业的繁荣[14]，大科学的巨大需求带动了产业发展，并孵化出半导体、集成电路、大型计算机、原子能、航空等高科技产业。③冷战结束后。外部压力消除，美国大科学的战略功能减弱，大科学由战略驱动向科学探索和创新转化，一些大型科学研究计划如超级超导对撞机项目被迫取消，商业和工业变为大科学的主要赞助者，同时更加关注商业回报[4,26]；受创新和经济政策影响，以军事、科学和工业复合体为主导的大科学项目逐步转向人类基因组、国家纳米技术等以创新为基础的经济可持续增长计划[34-35]；虽然大型实验室和科学项目众多，聚集多种科学设施以及各领域科学家和企业研发人员，却再难出现革命性的产业变革和技术创新[6]。截至2022年，美国仍然保留43个FFRDC，每个FFRDC的平均职工在4 000人左右；还有720多家联邦实验室，包括1 500多个独立研发设施，以及20 000多个企业实验室。可见，美国大科学在二战期间兴起后，由战略驱动向科学探索全面展开，在冷战期间达到顶峰，大科学承担较高的国家战略功能和外部压力，获得充足的资源投入，推动科学全面繁荣，产生大量颠覆式创新，对产业和经济产生巨大的促进作用；冷战结束后，由战略和科学探索转向创新驱动，虽然大科学的投入持续增加，但颠覆性的技术创新成果却很少，也没有孵化新的重要产业。

表2　美国典型大科学建设及国家实验室布局

阶段	大科学计划	参与主体及研究人员数量	关键词
二战期间（1940—1945年）	曼哈顿计划、雷达工程、战略轰炸机及火箭研究	由国防研究委员会、科学委员会等政府机构主导，MIT、加州大学、芝加哥大学加州理工等大学实施，成立橡树岭、洛斯阿拉莫斯、辐射实验室、喷气动力实验室等大型实验室，GE、贝尔实验室、IBM、雷神、波音、洛克希德—马丁等高科技企业广泛参与。曼哈顿计划研究人员1 000多人，雷达工程4 000人左右	战略优势 产学研 国家实验室
冷战期间（1946—1990年）	相对论重离子对撞机、国家点火设施等系列粒子物理工程，载人航天、阿波罗登月系列太空工程，卫生、天文、地球等其他计划	由能源部、国防部、NASA、国家自然科学基金等政府部门主导，成立阿贡、布鲁克斯海文、林肯实验室等国家实验室和研究中心，数量增至74个后逐步下降，大型研究中心的平均人员4 000人左右；大型科技企业广泛参与，承担主要的建设工作，孵化通信、半导体、计算机、互联网、GPS等高科技产业	政府主导 大型研究中心 大型企业 全面扩张
冷战结束以后（1991年至今）	国际空间站、人类基因组、先进技术发展、制造业扩展伙伴、信息高速公路、国家纳米、芯片及科学法案等系列产业计划	仍然由政府部门主导，大学与产业界广泛参与，大型研究中心数量下降至43个，联邦实验室及企业实验室大量增加，研究人员规模持续增加；提高科学型大科学的国际合作，吸引全球资本及人才的流入；通过重大产业技术计划，支持先进技术的孵化以及对中小企业的支持	创新导向 国际合作 综合化 产业技术

（二）中国的大科学的发展与演化

中国大科学建设经历奠基、跟随、追赶3个阶段，如表3所示。①奠基阶段。建国初期由于缺少完整的工业和科技人才体系，在极端困难情况下进行两弹一星、核潜艇、人工合成胰岛素等重大科技项目建设，被迫采取举国体制集中资源研制大科学需要的关键设备、材料和元器件，出色完成两弹一星等系列重要的大科学工程，在实践中创造性地运用系统工程和“三结合”等方法，探索出一条中国特色的大规模科学技术工程建设模式[23]。从铀勘探到第一颗原子弹制造成功，共计花费约107亿元，相当于当时一年国家财政预算的37%；为解决长征一号火箭的新材料问题，动员了冶金部、化工部、建材部及其所属工厂的设备和研发队

伍,几年时间内提供各种优良的新材料;涌现出“土炉子生产十几吨六氟化铀原料”“自行车打气筒加注火箭燃料”“九次运算”等壮举。两弹一星等大科学的成功使中国彻底摆脱外国的核讹诈,极大提升了民族自信心和自豪感。②跟随阶段。改革开放后长期以经济建设为中心,有限投入建设一批满足科研需要的大科学设施,并广泛参与国际大科学合作,跟踪国际科学发展趋势。中国参与的国际大科学项目包括太阳磁场观测、数字化地震台、托卡马克装置、回旋加速器、太空望远镜、射电望远镜、遥感卫星接收站、全球气候变化、地球海洋实施观测阵、国际水稻基因图谱研究、人类基因组计划等项目。③追赶阶段。随着中国经济发展和科技实力不断提升,2011 年出台《国家重大科技基础设施建设的中长期规划(2012—2030 年)》,加快推进大科学建设。截至 2021 年,中国已建设 78 个重大科学基础设施,大科学研究的深度和广度不断加强,在满足国家战略的同时兼顾科学探索和产业发展,自主开展载人航天、月球登陆、量子通信、北斗导航、深海探索、超级计算机等系列大科学建设,初步建成北京怀柔、上海张江、安徽合肥、粤港澳大湾区等国家科学中心,形成高铁、移动通信、大型计算机、导航、特高压、核电、海洋船舶、大飞机等全球领先的产业和技术,带动中国经济快速升级转型和发展。可见,中国早期大科学在外部压力以及内部极端困难的条件下,通过自主创新基本实现国家战略功能,同时也占用大量资源,虽然促进了相关配套产业和技术的建设,但由于无法形成具有经济效益的产业,对经济发展的促进作用有限;在跟随阶段长期采取大科学建设与经济社会协调发展,通过重点产业计划推动产业技术发展,同时通过科学型大科学的有限投入和国际合作满足科学探索需要,在这个阶段中国大科学的总费用投入不及 2000 年左右美国大科学的一年投入;随着中国经济发展逐渐增加大科学建设的投入,大科学才开始对科技、产业和社会产生一定的促进作用。

表 3　中国典型大科学建设布局

阶段	大科学计划	关键词
奠基阶段(1955—1977 年)	两弹一星、核潜艇、歼击机、晶体管计算机、射电望远镜,同时建立 156 个重点工程项目	极端艰难战略安全
跟随阶段(1978—2011 年)	雪龙号科考船、探索号潜水器、银河/曙光系列超级计算机、光刻机、核电站、环流器 1 号、神思激光、重离子加速器、正负电子对撞机、人类基因组计划、托卡马克装置、回旋加速器、太阳磁场观测等,全面参与高能物理、能源材料、天文学、地球与环境、生命科学等领域的国际合作;“六五”至“十一五”的国家科技创新规划,推出系列关键技术及产业计划,包括 863、火炬、攀登、973 等重点计划	有限投入国际合作产业振兴
追赶阶段(2012 年至今)	北斗导航、探月工程、载人航天、空间站、蛟龙号/奋斗者潜水器、20 系列飞行器、太行系列发动机、神光 2、东方超环、高温超导、上海同步辐射、上海光源、超强激光、中国散列中子源、环流器 2 号、FAST、3G、龙芯芯片、大规模芯片制造工艺、天河大型计算机、大型客机、大型船舶、高铁、特高压、第三代核电。“十二五”至“十四五”的国家科技创新规划,促进新能源、高铁、水利、卫星导航、特高压、杂交水稻等重大科技及产业技术突破	加速投入后发追赶产业化

(三)欧洲的大科学发展与演化

欧洲大科学主要分为欧洲各国分散建设以及欧盟统筹建设 2 种,如表 4 所示。①分散建设。德国、法国和英国具有较好的科学与产业基础,是欧洲大科学建设的主要国家。德国早在二战期间就采用工业化模式研制无线电通信、计算机、雷达、超音速飞机、潜艇、火箭、核武器等先进技术和武器,其中雷达和火箭的研发人员规模均超过 1 万人,核武器研发人员规模 1 000 人左右,具有典型大科学的规模特征,为德国取得较强的战略优势;战后德国受到国际体系制约,大科学建设主要以科学探索和产业技术为主,由 X 射线激光器、直线加速器、超强激光、反质子和离子加速器、高斯超级计算逐步扩展到航天、核能、信息技术、材料、新能源等领域。建立亥姆霍兹、弗莱恩霍夫、马普、莱布尼兹等大型科学研究协会以及科学院联盟、欧洲先进研究中心、工业研究联合会、政府科研中心等研究机构,共同构成德国大规模、多层次、相互融合的产学研联合研究体系。截至 2022 年,仅亥姆霍兹联合会就拥有 19 个国家实验室以及 4.2 万员工,年投入 45 亿欧元。二战中,法国和英国虽然经济遭到严重破坏,但战后仍然推出大量战略型大科学工程,同时核能、航空、高铁、生物等技术的研究及产业化也达到全球领先水平,然而大科学的大量投入也抑制了经济发展,总体经济规模逐渐落后德国和日本。20 世纪 70 年代,法国和英

国在完成基础的战略大科学建设后,逐步转向科学探索和产业技术,并以大科学工程为载体建立综合性科技创新中心。法国格勒诺布尔科学中心是欧洲的微电子、计算机、流体力学、材料、化学、核研究等领域最重要的科学技术中心之一,由施耐德电气公司牵头,覆盖从基础研究到应用研究再到产品生产,汇聚了 12 家微电子和软件企业、3 个顶级科学实验室、格勒诺布尔综合理工大学和傅立叶大学。英国也积极建设散列中子源、同步辐射光源、天文望远镜等大科学装置,并围绕大科学设施建设哈威尔等科技园,但规模及效益远低于硅谷等大型创新集群。②欧盟统筹建设。欧洲早期的大科学合作主要从粒子物理、航天、核能等领域开始,为区域安全和科技发展提供重要保障,也为欧洲全面科技合作奠定基础。欧盟从 1984 年开始推出系列基础科学与产业技术创新的框架计划,年均研究经费由 1984 年的 8.18 亿欧元增长到了 2020 年的 110.04 亿欧元,系列框架计划共投入2 907亿欧元。同时,2002 年成立欧洲科研基础设施论坛(ESFRI),统筹规划和协调欧盟成员国的大科学计划,合作建设大型强子对撞机、伽利略计划、国际热核聚变反应堆等基础研究设施,其中大型强子对撞机项目吸引 80 个国家的500 多所大学和机构共6 500 多位研究人员参与,约占全球粒子物理学领域人才总数的一半。可见,欧洲的大科学建设主要以科学探索和产业技术为主,全面覆盖前沿科学和产业技术,促进欧洲各国的科技合作,极大提高了欧洲的整体科学和技术水平,并吸引了全球人才向欧洲聚集。

表 4　欧洲典型大科学建设

阶段		大科学计划	关键词
分散建设	德国	德国电子同步加速器(1960)、正负电子双储存环(1969)、正负电子储存环(1975)、地下强子电子环加速器(1984);由核能等大型国家实验室研究联合会逐步形成包括 19 个大型研究中心、4.2 万人的亥姆霍兹联合会,全面覆盖粒子物理、航空航天、生物材料、信息技术等领域的大科学;弗莱恩霍夫、马普、莱布尼兹等科学研究协会,进行大规模产业技术和基础研究,拥有 240 多个研究所,研究经费超过 30 亿欧元;德国还拥有工业研究联合会、科学院联盟、欧洲先进研究中心、政府科研中心等研究机构,构成密集的产学研融合体系	粒子物理 科学探索 产业技术 全面体系
	法国	核武器(1960、1968)、系列火箭(1960)、导弹(1960)、超音速飞机(1962)、卫星(1965);高通量中子源(1967)、粒子加速器(1973、1983、2019)、同步辐射光源(1992、2002)、桌面加速器(2006);核能(1950)、高铁(1974)	大国抱负 技术自主
	英国	核武器(1952、1957)、系列核能计划(1957、1970、1980);加速器(1957)、同步辐射光源(1980、2002、2007)、散裂中子源(1985)、先进光源(2005、2008)、天文望远镜(1979、1987、2000)、先进信息技术计划(1983)、干细胞计划(2006)	战略投入 投入不足
统筹协调	早期合作(1954—1983 年)	英法协和客机(1962)、欧洲南方天文台(1962)、质子对撞机(1969)、德法劳厄—朗之万研究所(1967)、超级质子同步加速器(1976);成立 CERN(1954)、欧洲航天研究组织(1962)、欧洲发射发展组织(1964)等合作组织	科学探索 合作创新
	框架计划 FP(1984 年至今)	框架计划 FP1 – FP7(1984—2013)投入 1 182 亿欧元,地平线 2020 计划(2014—2020)投入 770 亿欧元,地平线欧洲(2021—2027)投入 955 亿欧元,覆盖信息、通信、材料等基础研究及产业技术发展计划	基础研究 先进技术
	ESFRI(2002 年)	ESFRI 历年支持的大科学设施数量:2006 年 35 项,2008 年 45 项,2010 年 51 项,2016 年 50 项,2018 年 54 项	全面大科学

注:括号中数字为年份。

(四)原苏联(俄罗斯)大科学发展与演化

原苏联在与美国冷战对抗中,大科学承担核武器、洲际导弹、重型火箭、人造卫星、载人飞船、空间站、核潜艇、各种飞机等战略武器的研发,形成全球领先的科技优势,实现了国家战略和国防科技飞跃,但原苏联超出自身经济能力过度发展大科学,也对经济和社会形成严重负担和抑制作用[9]。如表5 所示,原苏联在国防相关的研发支出超过美国 20%,研发人员数量高达全球研发人员总数的 25%,其中 80% 的研发人员集中在科研院所,企业的创新资源和能力较弱,仅在核电、武器形成规模产业,没有形成半导体、计算机、互联网、卫星导航、民用航空等规模产业。冷战结束后,俄罗斯继承了原苏联的主要大科学设施和技术,但由于经济体系崩溃,人才大量流失,新建大科学工程较少,主要以粒子物理、航天等优势技术参与国际大科学的合作。可见,原苏联主要集中建设粒子物理、核能、太空探索等战略型和科学型大科学,拥有全球领先的科技水平、科研院所和人才体系,但产业转化能力较弱,并对经济的带动作用有限,导致整个国家经济发展严重失衡。冷战结束后,俄罗斯虽然继承原苏联的大多数大科学资产,但由于经济基础较弱,大科学建设逐步向技术创新和国际合作转型。

表 5　原苏联(俄罗斯)典型大科学建设

阶段	大科学计划	关键词
战略型 (1945—1991 年)	超音速飞机(1943)、系列导弹及火箭计划(1945),其中早期 P2 火箭经历 5 年时间,投入 30 亿卢比;原子弹(1945)、系列大型粒子加速器(1946)、氢弹(1953)、超级计算机(1950)、系列大型望远镜(1951)、核电站(1954)、系列核聚变设施(1954)、极地探索(1955)、人造卫星(1957)、系列太空探测器(1959)、载人航天(1961)、高能激光(1963)、空间站(1971)、航天飞机(1976)、深海潜航器(1976)、海洋科考船(1980)、全苏计算机网络(1980)、卫星导航(1982)。规模庞大的研究院所和实验体系,1991 年解体前研究人员数量超过美国,企业主要承担产品生产	战略科技 全面领先 院所体系 产业转化少 经济崩溃
科学型 (1992 年至今)	国际热核聚变反应堆(1998)、国际空间站(1998)、自由电子激光(2003)、反质子和离子研究(2010)、超级计算机(1998)、信息技术基础设施(2000)、强子对撞机(2011)、核聚变设备(2011)、同步辐射光源(2013)、大型强子对撞机(2011)、第四代同步辐射光源(2011)、中子反应堆(2011)、激光光场(2011)、海洋科考船(2011)、空间望远镜(2019)	国际合作 产业转化

注:括号中数字为年份。

(五)日本大科学发展与演化

与德国类似,日本在二战期间通过战斗机、无线电、化学及生化武器的大规模研究,积累了大规模产学研协同创新的初步经验,同时也为战后电子、化工、家电、汽车等产业快速发展提供大量技术和人才积累。战后,日本主要开展科学型和产业型大科学建设,如表 6。早期大科学主要集中在粒子物理、核反应堆、火箭、卫星等具有较高战略意义的科学研究,形成以原子能研究所、理化学研究所、航空技术研究所、金属材料技术研究所等大型国家研究机构以及主要高校为中心的研究体系,建成种类繁多加速器集群和空间发射工具;随着日本经济的恢复和高速增长,推出大量产业型大科学快速提高产业技术和竞争力,覆盖从钢铁、造船、化工、汽车等传统产业到收音机、录音机、照相机、彩电、半导体、计算机等高科技产业。以集成电路为例,日本政府组织东芝、三菱、富士通、日立、日本电气等大企业进行超大规模集成电路的合作开发,成功突破半导体微加工、结晶等制造工艺和设备等系列关键技术[21]。1986 年,日本半导体产品的全球市场占有率达到 45%,超过美国成为全球第一半导体生产大国。由于半导体制造、材料和设备产业的大量聚集,九州岛迅速崛起为日本“硅谷”。20 世纪 80 年代,日本的随机存储器、半导体制造等产业超越美国,导致硅谷最严重的衰退,1986 年美国半导体行业大幅裁员和关闭,

表 6　日本典型大科学建设

阶段	大科学计划	关键词
萌芽阶段 (1935—1945 年)	研究机构和人员激增:1942 年研究机构增加到 2 000 个,研究人员达 4.9 万人;海军技术研究所、NEC、东芝、日立、三菱电机、丰田等公司均有几百人规模的研究人员;东京大学、东北大学、大阪大学等与科研院所在无线电、材料、化工、航空等领域有技术研究合作;到 1945 年共成立 200 多个产学研组织,进行雷达、聚乙烯材料等技术研究,其中化学和细菌武器研究规模高达 5 000 人左右	科学的应用 产学研合作 大规模研发
科学型及产业型 (1954—1986 年)	1954 年,成立原子能、航空航天等研究机构和企业联合体,开始大规模研究加速器、反应堆、核电站、火箭、卫星等技术;1966 年,通产省、农业省、运输省推出磁流体发电、超高性能计算机、乙烯制造、煤炭气化、火力发电脱硫、高压输电等项目,预算 23.03 亿日元,提高产业技术的引进吸收和自主创新;1968 年,日本开始加速建设各类大科学项目:快增殖反应堆(1968)、重离子环形回旋器(1975)、临界等离子装置(1976、1988)、高温工程实验堆(1977)、光工程(1978)、激光 XII(1980)、原型快增殖反应堆(1983)、重离子束治疗设施(1986);喷气式发动机(1971)、高清电视(1987)、超大规模集成电路(1976)、第五代计算机(1978)	粒子物理、 航空航天 产业技术 寓战略于科学、产业
科学型 (1987 年至今)	离子照射设施(1988)、大型螺旋装置(1990)、KEKB 加速器(1994)、J-PARC 高强度质子加速器(2001)、Spring-8 大型放射光装置(1991)、放射性核束装置(1997)、X 射线自由电子激光装置(2011);超级 SINET(2002)、国际研究网格计划(2003)、京系列超级计算机(2006);LUNAR-A 月球探测卫星(1991)、MUSES-C 太阳系外探测器(2003)、SOLAR-B 太阳观测卫星(2006)、SELENE 月球探测卫星(2007)、PLANET-C 金星探测卫星(2010)、Akatsuki 金星探测卫星(2016)、BepiColombo 金星探测卫星(2018)、宇宙空间模拟舱(1989)、国际空间站日本舱(2008)、神冈仪(1983)、超级神冈仪(1996)、Subaru 红外光学望远镜(1996)、ALMA 射电望远镜(2013);深海 6500 (1989)、海沟器(1995)、深海 12000(2013);未来号核动力科考船(1997)、地球模拟器(2002)、深海钻探船(2005);喷气发动机(2003)、超导(2003)、纳米材料(2005)、新能源(2005)、颠覆性技术创新计划(2016)、人工智能与物联网(2020)、生物技术(2020)、半导体制造(2020)、后 5G 技术(2020)、登月计划(2020);系列科技与创新计划(1996—2025),推动日本向技术、科学与创新立国转变	全面科学探索及产业化应用 技术立国、科技创新立国 大型企业主导 产学研融合

注:括号中数字为年份。

1/5 人员失业[14]，其中 IBM 裁员 50% 以上。随着美国政府对日本采取包括“301 调查”以及强制日本签订《美日半导体协议》等系列打压措施，日本半导体和计算机产业被迫退出与美国的竞争。1980 年以后，日本的大科学建设主要投向基础研究，由原子能研究所、理化学研究所、宇宙航空研究所、产业技术综合研究所、物质材料研究所等国家研究机构主导，集中在各种粒子加速器、激光、热核聚变、宇宙探测以及地球海洋等研究项目。以加速器为例，日本建设各种规模加速器超过 1 000台，用途从粒子物理研究扩展到生命科学、纳米材料、微观物质结构和微量元素分析等领域，推动日本在生物制药、纳米材料、高精度制造等产业占据全球主导地位。可见，日本大科学首先从核能、粒子物理等领域向产业应用扩张，在受到美国的激烈打压后全面转向科学探索，总体上仍然以产业竞争和战略优势为目的推动科学技术的快速转化。

四、大科学技术创新分析

（一）大科学的外部动力

1. 大科学的竞争性。如表 2 所示，冷战期间美国与原苏联的激烈战略竞争导致双方均通过战略型大科学获取战略优势，为了进一步利用科学研究提高战略优势，大科学向科学探索全面扩展。欧洲、日本与美国没有战略竞争，战后除英国和法国为了战略自主大量投入战略型大科学，后来逐步转向经济发展与产业竞争，整体上欧洲和日本的大科学建设主要投向产业技术和基础科学探索：日本通过产业大科学提高计算机及半导体等产业的竞争力，但由于与美国竞争激烈遭到美国打压，逐步向粒子加速器、太空探索等科学型项目集中，带动了高精度制造、新材料等规模相对较小的基础科技产业，减小对美国主导产业的竞争和威胁，如图 2 及图 3 所示。新中国采取独立自主外交政策，战略上同时受到主要大国的挤压，被迫在极端困难条件下集中资源优先建设两弹一星等战略工程；在实现国家的战略安全后，中国通过大科学建设的有限投入，满足科学探索和经济社会协调发展的需要。可见，美国和原苏联通过大量战略型大科学建设进行战略主导权竞争，中国与英国、法国通过有限战略大科学实现战略自主，日本与德国通过科学型和产业型大科学建设获取技术进步和产业升级。

命题 1a：独立自主的国家间具有较强战略竞争需求，所有国家均具有产业竞争需求，战略型大科学具有战略竞争作用，产业型大科学具有产业竞争作用。

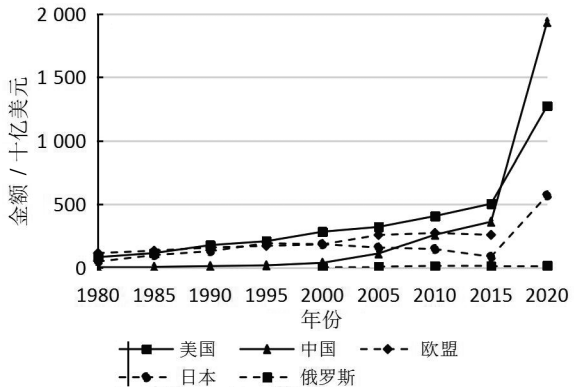


图 2　1980—2020 年全球主要国家的高科技制造业产值

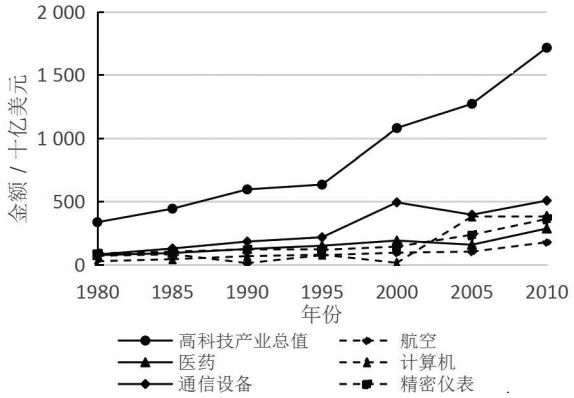


图 3　1980—2000 年全球高科技产业出口产值

2. 大科学的规模投入。大科学建设需要各种要素大规模投入，以阿波罗登月为例，此计划历时 11 年，耗资 240 亿美元，动员 2 万家企业、200 多所大学、80 多个科研机构，总人数最多时超过 40 万人，其中研发人员 4. 3 万人。1950 年，美国工业实验室约 2 500 个、研发人员高达 7 万人，到 1990 年工业实验室达 12 000 个、研发人员超过 150 万人，其中 IBM、贝尔实验室、摩托罗拉、英尔特、杜邦、GE、波音等大型企业为大科学建设提供了强大的产业技术。如图 4 和图 5 所示，美国整体的研发费用及研发人员总量远远超过其他国家。欧洲与日本的大企业也在各自的大科学建设中承担重要的作用。西门子、飞利浦、爱立信、施耐德等大量企

业为大科学建设提供技术支撑。虽然理化学研究所及原子能研究所规模较小,但三菱、川崎、石川岛播磨、东芝、日本电气、日立、富士通、日产、日本海事联合公司等大型企业广泛参与日本大科学建设。截至 2020 年年底,日本公立研发机构 501 个,企业实验室 20 527 个,企业研发人员占日本研发人员总量的 60% 左右。可见,大科学大规模投入包括多层次的人才体系、较好的工业体系以及经济基础,其中大规模人才是大科学建设的核心要素。相对而言,虽然中国大科学工程的总体投入规模较小,但单个大科学工程的资源投入规模更大,以原子弹研制为例,调动全国 20 多个省份、26 个部委以及 900 多家研究院所和工厂,由于产业基础薄弱和外部技术封锁,甚至连普通的电缆都需要组织专门的研究机构和企业共同攻克。

命题 1b:大科学的规模投入带动以科学为基础的技术产业的发展,同时也主要依靠大规模高技术企业的支持,产业不发达国家的投入规模显著高于工业发达国家。

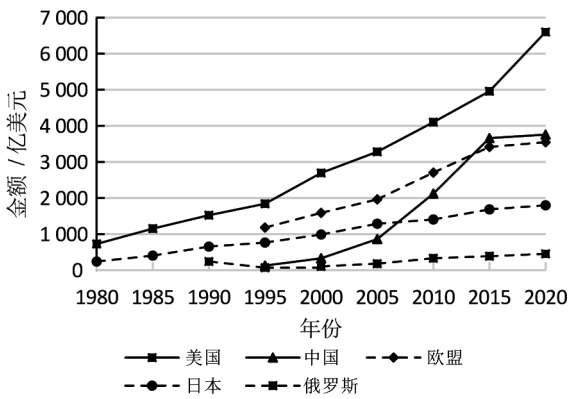


图 4　1980—2020 年全球主要国家或地区研发费用

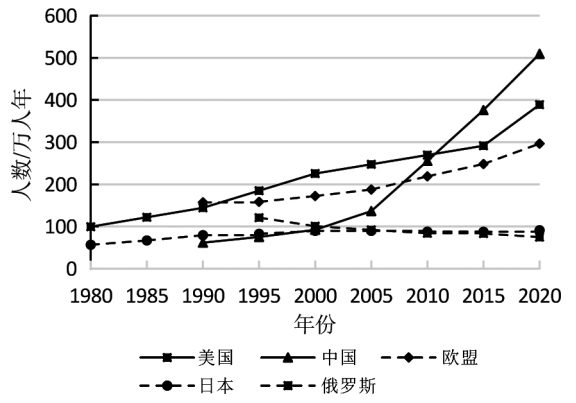


图 5　1980—2020 年全球主要国家或地区研发人员数量

3. 大科学的聚集与技术扩散。通过大学、科研院所、高科技企业的大规模聚集和技术交流,大科学加快了人才的培养和产业技术创新,并通过人才与技术扩散带动产业与经济的发展。GE、西屋电气通过参与曼哈顿计划,成功掌握了核反应堆及核能技术;MIT 雷达、SAGE 工程对大型计算机和半导体等先进技术的需求,推动了数字计算机及集成电路等技术的发明,也为这些新兴技术的产业化提供了早期市场空间;CERN、LOFAR 望远镜虽然没有提供任何技术,通过高速数据网络和高灵敏仪器的极端技术需求推动了飞利浦、Sicon、IMC、爱立信、ABB 等供应商的芯片研发和制造能力[8,36]。如表 2 所示,冷战期间美国成立 700 多家国家实验室,包括 1 500 个独立研发设施,其中大型国家研究中心最多建设了 74 个,占联邦研发支出的 1/3 左右,截至 2022 年仍然保留 43 个 FFRDC,研发投入 235.1 亿美元,占政府研发投入的 1/3。这些国家实验室主要集中在美国东北部及加州等东西海岸,带动了 128 公路区域及硅谷等地产业集群的繁荣;日本政府组织的半导体计划成功突破半导体制造工艺和设备等系列关键技术,加速了产业技术的后发追赶和技术升级,极大提高日本半导体产业的竞争力[7],逐步在九州岛等地建立半导体产业创新集群。但在美国的打压下,日本大科学由粒子物理向蛋白质结构和微量元素分析等领域扩展,带动高精度制造、纳米材料、生物制药等新兴产业的发展,建立筑波科学城等综合科技创新中心。欧洲虽然建成一些创新中心,推出大量产业和科学探索计划,但无法形成类似硅谷超大型人才聚集区域,最终在半导体、计算机、互联网等产业全面落后美国和日本,欧洲大科学的产业带动作用相对较小。中国由于产业经济基础薄弱,核能、航空、半导体、计算机等技术的产业转化也较为滞后。可见,美国通过战略型和科学型大科学成功孵化核能、航空航天、卫星通信、计算机等一系列技术和产业;日本通过产业型大科学提高后发产业竞争力,通过科学型大科学带动基础技术产业的发展;大科学的技术转化作用在聚集度不高或产业不发达国家和地区明显下降。

命题 1c:战略型大科学由于严格保密扩散困难,只有核能、GPS 等少数技术实现产业转化;科学

型大科学以科学发现为主,技术创新并转化为产业技术的周期较长,相关产业的技术领先程度较高,但规模较小对产业的直接带动作用较小;产业大科学由参与企业直接技术创新和扩散,对于后发产业的技术追赶效率较高。

命题1d:战略型及科学型大科学通过对参与企业的极端技术需求实现知识向企业的扩散,同时为企业技术创新提供资源,降低企业技术创新的投入压力,从而形成大科学的需求拉动技术创新的范式,而大科学工程的大量聚集为企业技术创新并孵化新产业提供持续的科学知识和市场动力。

命题1e:大科学的适度空间聚集有利于知识与技术的扩散,促进产业技术的发展。

4. 大科学的合作性。冷战结束后,大科学的战略需求下降,但大科学急剧增长的要素需求超出了大多数国家的承受能力,尤其科学型大科学以科学发现为目的,通常并不直接产生新的技术创新和经济效益。欧洲强子对撞机、美国超级超导对撞机、日本直线对撞机、费米实验室的中微子、中国江门中微子以及四川锦屏地下粒子实验室等大科学项目均面临庞大经费预算的困境。粒子物理与太空探索等大科学的建设大幅降低,并通过国际合作以分摊大科学的巨大成本[25]。探测反物质的阿尔法磁谱仪计划有10多个国家参与,磁谱仪造价20亿美元左右,而实验所用的空间站耗资近1 000亿美元;人类基因组计划也由18个国家参与,长达10余年,耗资近30亿美元。虽然国际合作提高了后发国家的研究水平,但是由于大科学的竞争性,国际合作仍然存在很多合作障碍和门槛,如国际空间站和伽利略计划先后排除中国的参与,同时与国家的综合国力和国际地位紧密相关。可见,大科学的主要成本为人员和设备,战略需求的下降以及科学型大科学的技术创新及转化周期较长,巨大费用和人力投入与经济社会形成开环系统,如图6所示。

命题1f:大科学的战略需求下降导致大科学的战略效用下降及经济效用不足,进一步促进经济体减少对科学型大科学投入,而科学探索的内在需求和规模持续增加,使大科学通过国际合作分担不断增加的投入。

命题1g:先发者通过合作解决大科学的投入经费和人员不足问题,后发者通过合作实现大科学知识和技术的交流,但大科学的潜在战略性决定了难以在核心技术层面达成的合作。

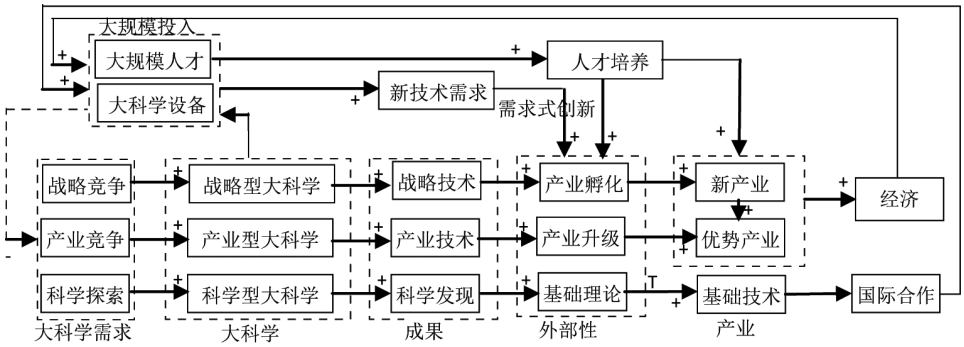


图6 大科学的技术创新的外部动力

(二)大科学的内部动力

1. 大科学的不确定性。如图7所示,由于多领域的前沿探索,增加了大科学的合作规模、复杂性和不确定性,而合作规模、复杂性和不确定性之间进一步彼此相互增强。通过采取多路径并行研究方法,降低大科学的不确定性及总体失败概率,而关键任务的失败仍然导致整个路径的失败,因此需要采取小规模探索研究,解决大科学前期理论和技术的不确定性,降低大科学的失败概率和成本。质能方程的发现和劳伦斯加速器的发明为曼哈顿计划的成功奠定了理论和技术基础,而攻克癌症计划由于缺乏必要的理论和技术基础而失败。同样,没有贝尔实验室的微波通信的仪器和设备,普林斯顿的天体物理学家关于宇宙大爆炸的测量不可能成功。日本的数字电视、超级计算机等产业大科学对产业前沿技术的开发也出现失败。

命题2a:前沿性、多学科、多部门的大规模组合增加大科学的复杂性和不确定性,前期的基础理论与技术的探索和准备可以降低大科学的不确定性。

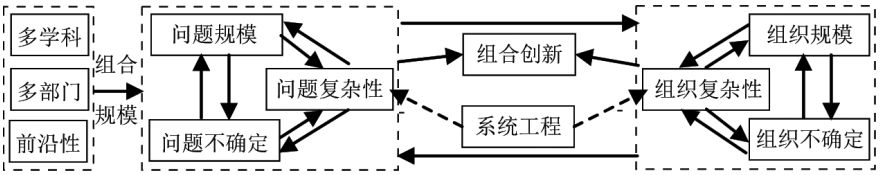


图 7　大科学的复杂性、不确定性及组合创新

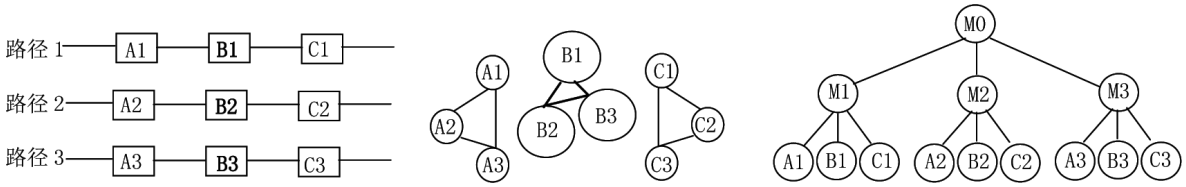
2. 大科学的合作规模。由于研究的复杂性、合作规模效率的提升和资助规模的扩大,大科学的规模不断扩大;科研的资助方由个人转向国家和企业,科研由兴趣驱动和为科学而科学转向国家和企业的利益驱动,科研组织逐步团体化和规模化。同时,科学研究的复杂性更加依靠科学团队,科学明星的作用下降[37]。大型科学实验需要来自多个机构和数百名研究人员,研究人员规模上升到 1 000 人以上[10]。然而,合作规模扩大进一步增加了大科学的复杂性和不确定性。如图 7 所示,通常采用系统工程的方法对大科学进行模块化分解,把大科学问题转化为一系列小规模问题分别解决,从而降低大科学的整体复杂性。

命题 2b:大科学通过分工合作,使问题的规模、复杂性和不确定性转化为组织的规模、复杂性和不确定性,并且两者相互增强。

命题 2c:采取系统工程降低大科学的整体复杂度,实现复杂问题转化为简单问题的数量叠加,进一步通过研发资源的大量投入解决规模问题,并集中资源对关键科学和技术进行突破。

3. 大科学的分工组织。与传统科学研究的自组织结构不同,大科学主要采用层级和集中式组织结构[6],减少因科研资源及科学的首发权竞争而导致的研究人员非理性和投机行为;科学发现的优先权和论文发表等评价体系阻碍了科学合作的规模[6],像诺贝尔奖最多只能 3 名获奖者,导致科学发现的成果分配矛盾,如图 8a 和图 8b 所示。以新中国的航空工业为例,依据系统工程思想构建的大科学组织体制,建立以飞机制造为核心的大工业和大科学建制,组建研究所、主机厂、辅机厂、专科学校、技术学校等科研、制造和教育体系[28]。日本集成电路计划中政府与企业共同组建联合研发机构,为公共技术研发提供补贴,同时与企业共同负担研发费用,不同企业承担各自优势技术研发,既实现了产业公共技术和关键技术的突破,又保护和加强了不同企业的技术优势[11]。美国大科学由政府主导,形成以国家实验室为中心、大学和高科技企业广泛参与的创新体系。

命题 2d:如图 8a 和图 8c 所示,大科学通过系统化的分工组织,实现大规模研究资源在不同研究路径的覆盖和有效分配,从而提高科研资源的集约式利用和规模效率,避免了传统科学研究的盲目性以及合作规模的限制。



a. 大科学的并行路径　　b. 科学研究的自组织结构　　c. 大科学的层级结构

图 8　科学研究的路径与组织结构

4. 大科学的组合式创新。如图 9a 所示,通过较大组合基数提高技术的组合创新路径,通过组织分工使技术创新路径与人员接近均匀分布,而自由分工的技术创新网络接近泊松分布。多路径研究也能提高科学发现的数量,产生对社会和经济重要影响的副产品,如美国国家物理实验室的超级计算机的互联网、CERN 中的触摸屏和万维网、LOFAR 中的相控雷达、星球大战(战略防御)计划中的 GPS 系统等技术。大科学通过大量并行路径的探索,适度浪费反而更有效率,能发现

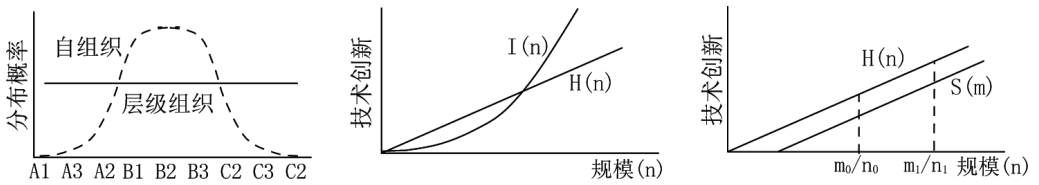
更合适的方案,而过于刚性的目标设计和成本控制往往容易导致更大的损失,美国航天飞机计划的失败在于过早确定设计方案,为避免浪费从而取消对替代方案的支持。可见,大科学不同领域的前沿性和不确定性形成了大规模的路径探索,大量不同领域研究人员的高强度和充分的交流增加了重大发现和发明的概率,同时通过充足的资源投入与有效的内部组织,实现整体多路径探索的有效覆盖,增加大科学组合创新的数量。

命题2f:如图9b及图9c所示,假定有 n 个技术组合创新,所有可能的技术组合数为 $I(n)$,如式(1),其中 α 为组合创新系数;技术创新难度 $H(n)$ 与技术数量正相关,如式(2),其中 β 为创新难度系数;团队创新选择条件为团队能力 $S(m)$ 低于创新难度 $H(n)$,如式(3),其中 m 为团队规模。

$$I(n) = \alpha \cdot (C_n^1 + C_n^2 + \cdots + C_n^n) = \alpha \cdot (2^n - 1) \quad (1)$$

$$H(n) = \beta \cdot n \quad (2)$$

$$S(m) \leqslant H(n) \quad (3)$$



a. 不同分工的人员分布　　b. 组合创新的数量与难度　　c. 团队组合创新的选择

图9 组合创新与团队选择机制

(三)内外动力的相互作用

如图10所示,大科学发展的主要动力是外部竞争和压力,并由外而内形成设备和人才等资源密集投入以及有效组织,进而形成大规模技术创新。尽管大部分问题可以通过系统工程方法分解,由于大量不同前沿领域的交叉,仍然存在部分问题无法分解,需要多领域研究人员紧密配合才能解决。然而,大科学的前沿性导致不同领域研究人员之间共同知识较少,合作研究首先遇到跨学科交流障碍,需要建立临时交流区和中介语言,推动研究人员不断互动、沟通和碰撞,逐渐成熟和规范化后形成新的理论和学科[11]。临时交流区构成了无法再分的研究团队,大规模前沿领域数量导致临时交流区规模较大,创新的难度也显著增加,只有科研人员充分交流甚至激烈碰撞才能实现有效合作,只有科研人员具备充足的动机才能完成高难度的创新;大科学充足和密集的资源也为研发人员提供饱和激励[38],提高团队的协调和创新效率,同时由国家战略和产业竞争形成大科学强大的外部压力,进一步增加团队的凝聚力和交流合作的充分性,促使颠覆式创新的涌现。

命题3a:大科学的外部竞争促进资源密集投入和压力传递,饱和激励实现外部压力转化为大规模团队的向心力和创新动力,促进多领域研究人员的聚集和交流,提高研究人员的创新潜力,从而实现多领域前沿知识和技术的交叉组合以及颠覆性技术创新的涌现。

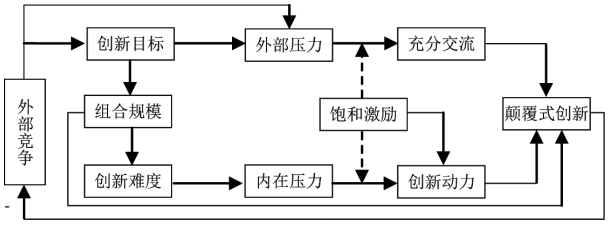


图10 大科学的组合创新向颠覆式创新的涌现

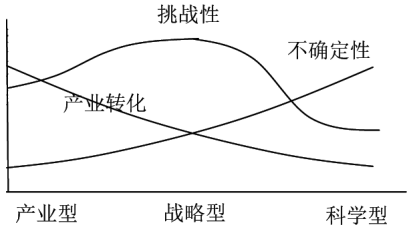


图11 大科学的技术创新

(四)不同大科学创新范式比较

如表7所示,战略型大科学主要目标是战略技术,但由于战略竞争的迫切性以及大科学的不确定性,战略型大科学的创新目标和投入规模更高,创新难度更大,同时战略需求的弹性较小,导致原

苏联的投入规模不断增大,英国、法国和中国也被迫投入战略大科学;虽然战略型大科学可以产生颠覆式创新,但由于战略竞争和技术保密,向产业的扩散和转化较低,主要通过需求式创新带动产业技术升级,计算机、半导体等革命性技术均由需求带动而产生。产业型大科学主要通过最新技术的组合式创新实现产业技术升级和后发追赶,因而企业成为创新的主导,技术创新效率较高,转化周期较短;产业型大科学仍然存在较强的竞争性,技术在参与企业之间充分扩散,但对于外部企业的技术扩散比较难。科学型大科学以科学发现为主,技术创新并不是首要目标,由科学发现向技术的转化周期最长,因而竞争性较弱,也容易扩散,企业主要在大科学的建设阶段参与,通过由科学向技术扩散实现需求式创新。

命题 3b:由科学、技术及产业资源的聚集形成不同的组合创新。科学型大科学主要通过科学理论与科学理论的组合和交叉实现新的科学理论的发现;战略型大科学主要通过科学理论与产业技术组合实现技术创新,并在外部战略竞争压力下实现颠覆式创新;产业大科学主要通过技术与技术的组合实现新产业技术,并在外部产业竞争压力下实现颠覆式创新。

命题 3c:不同类型大科学均存在组合创新,外部压力不足时技术的组合创新规模和颠覆式创新均下降;科学型大科学的外部压力较小,主要以科学的组合创新为主,而技术的组合创新规模和颠覆式创新均较少。

表 7　大科学的技术创新比较

类型	核心创新	创新范式	挑战性	竞争性	创新压力	企业参与	技术扩散	转化周期
战略型	战略技术	组合式、颠覆式、需求式	高	战略竞争	高	高	困难	较长
科学型	以科学发现为主	组合式、需求式	中	竞争性弱	低	低	容易	最长
产业型	产业技术	组合式、颠覆式	较高	产业竞争	较高	主导	较难	短

(五)不同国家和地区大科学的演化

1. 美国与原苏联的大科学。二战后,战略竞争促进美国大量大科学建设,推动军事、科学、产业复合体形成,促进技术创新以及新产业的孵化。冷战结束后,大科学建设投入虽然持续增加,但外部压力消失导致大规模创新动力不足和效率下降,再没有出现颠覆性技术创新。原苏联为了获取战略优势,研发开支的 75% 左右投在战略和国防领域,高出美国 20%,进攻性战略武器高出美国 60% 左右,虽然获取了战略优势,并在粒子物理和航天领域取得领先地位,但由于缺乏较好的产业和经济基础,通信、计算机、卫星导航产业均没有成功产业化,大科学孵化的核能与航天等产业对经济的拉动作用有限,大科学与经济发展形成开环系统,同时大科学的大规模资源投入也严重挤出经济发展的投入,而大型核电站、登月火箭及暴风雪航天飞机等大型工程连续发生严重事故,加速推动原苏联的崩溃。

命题 3d:大科学投入规模与经济发展成倒 U 型关系:美国通过大规模的大科学投入实现半导体等高新产业孵化,带动经济繁荣;原苏联大科学投入规模过高,虽然拥有较高科技水平,但科技转化率低仍然导致经济崩溃。

2. 欧洲与日本的大科学。欧洲和日本首先投入粒子物理领域,并在产业技术创新与美国竞争,欧洲和日本产业大科学直接加速产业技术进行创新,快速提高产业竞争力,构成了大科学—技术创新—产业—经济发展之间的增强回路。由于新技术产业的繁荣同时还需要充分的市场需求,而日本缺少市场空间和战略空间,被美国打压后逐步向科学型转变,通过科学型大科学的聚集推动了材料、精密制造等产业的技术创新。虽然欧洲总体市场规模与美国相当,但欧洲未形成统一市场,仍然需要科学型大科学加强内部合作[29]。另外,如图 5 所示,相对于美国,欧洲与日本存在人才总量和杰出人才不足问题,日本粒子物理研究人员数量只有美国的 1/10;1969 年,美国研发投入是德国、法国、英国、日本的投入总和的 2 倍多;日本在第五代计算机研发项目仅拥有 50 名左右的研发人员,而在 20 世纪 80 年代,仅 IBM 一家研发公司的研发

人员规模就接近 10 万人,人才不足导致日本在技术组合创新的指数增长中很难全面跟上各主流技术。

命题 3e：大科学的投入规模受国家或地区的经济发展水平和人才规模限制。

命题 3f：产业大科学与产业经济构成增强回路,推动国家和地区经济快速发展。

3. 中国大科学的演化。中国由于人才和产业积累薄弱,两弹一星建设期间被迫组织大规模基础工业研究,建设 156 个工业项目仍然远远无法满足大科学的设备和仪器需要,大科学建设既促进了新中国产业技术的快速提高,又大量占用了稀缺的经济资源;中国在完成少数战略型大科学后,主要采取有限投入和与经济社会均衡发展策略,“六五”至“十五”期间,所有重大科技及产业项目的投资共计 712 亿元,仅相当于美国 20 世纪 80 年代大科学的年度建设费用,实现经济发展后才开始快速追赶。

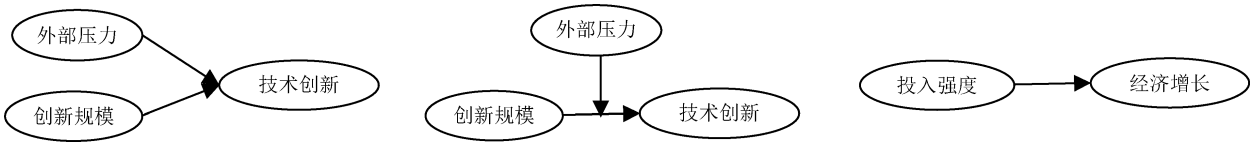
命题 3g：战略型和科学型大科学对经济的带动作用主要集中在需求拉动创新,同时需要国家具有较好的经济和产业基础。

命题 3h：后发经济体的大科学以产业型为主,加快基础产业的技术追赶。

五、实证检验及系统动力仿真

(一) 实证检验

采用 5 个模型对主要质性研究结论分别进行实证检验。模型 1,不同国家及类型大科学的投入费用、外部压力和创新规模、技术创新的 ANOVA 检验;模型 2,大科学创新规模与技术创新的回归分析,如图 12a 所示;模型 3,外部压力对创新规模与技术创新关系的调节作用,如图 12b 所示;模型 4,美国和原苏联的大科学投入和技术创新 t 检验;模型 5,大科学投入强度与经济增长的回归分析,如图 12c 所示。借鉴 D'Ippolito 等[29]、王婷等[17]、敦帅等[16]关于大科学的投入产出及效益评价指标,采用大科学的核心技术创新数量作为技术创新指标,大科学的科学家及工程师数量作为创新规模,外部压力根据 Delphi 法由相关专家评估获取[16],大科学投入费用占 GDP 百分比作为投入强度,GDP 增速作为经济增长指标。根据质性研究的创新规模与技术创新的指数函数关系,检验分析中对技术创新取对数,并对投入费用、外部压力和创新规模进行标准化处理;根据大科学投入强度与经济增长的倒 U 型关系,构造二次多项式回归模型,对大科学投入强度去中心化后取平方。



a. 技术创新的规模效率模型　　b. 外部压力的调节模型　　c. 投入强度与经济增长模型

图 12　大科学技术创新的实证模型

1. 描述性统计。样本数据取自美国、中国、欧洲、日本、原苏联(俄罗斯)等 5 个主要国家和地区的 397 个大科学项目,考虑数据的完整性和有效性,剔除数据不完整样本后获得 125 个大科学项目有效样本,分别取自粒子物理、天文望远镜、生物、核武器、航天、航空、雷达、无线电、核能、高铁、计算机、半导体等 12 个领域。如表 8 所示,模型 1 ~ 模型 3 的样本数量 97,其中科学型占 20.6%,战略型占 44.3%,产业型占 35.1%。投入费用、创新规模、外部压力、技术创新的均值分别为 50.890、5 782.577、4.052、3.691,其中投入费用、创新规模、外部压力均与技术创新具有显著正向相关,相关系数分别为 0.277、0.491、0.369,投入费用与创新规模相关系数为 0.499。如表 9 所示,模型 4 ~ 模型 5 的样本数量 28,取自 1970—1990 年美国及原苏联的太空大科学投入及经济增长截面数据,全部为战略型大科学,其中美国占 35.7%,原苏联占 64.3%,投入强度及经济增速均值分别为 1.546 及 3.7。

表 8　模型 1 ~ 模型 3 的样本数据描述性统计分析

名义变量统计								度量变量均方根及相关系数						
变量	分类	数量	百分比	变量	分类	数量	百分比	变量	均值	标准差	投入费用	创新规模	外部压力	技术创新
国家/地区	美国	28	28.9		原苏联(俄罗斯)	10	10.3	投入费用	50.890	133.775	1	—	—	—
	中国	32	33.0		科学型	20	20.6	创新规模	5 782.577	13 176.744	0.499 **	1	—	—
	欧洲	17	17.5	类型	战略型	43	44.3	外部压力	4.052	1.564	−0.016	−0.002	1	
	日本	10	10.3		产业型	34	35.1	技术创新	3.691	4.957	0.277 **	0.491 **	0.369 **	1

表 9　模型 4 ~ 模型 5 大科学投入强度与经济增长描述性统计

名义变量统计				度量变量均方根及相关系数					
变量	分类	N	百分比	变量	均值	标准差	投入强度	投入强度^2	经济增速
国家/地区	美国	10	35.7	投入强度	1.546	1.036	1	—	—
	原苏联	18	64.3	投入强度^2	1.035	1.597	0.477 *	1	—
类型	战略型	28	100	经济增速	3.787	6.091	−0.223	0.480 **	1

2. 不同国家及类型大科学的 ANOVA 检验。对不同国家、类型的大科学投入费用、创新规模、外部压力及技术创新 ANOVA 检验。如表 10 所示，原苏联(俄罗斯)的技术创新均值显著高于中国与日本，科学型的创新规模显著低于产业型，科学型的外部压力显著低于产业型及战略型，战略型显著高于产业型，科学型的技术创新显著低于产业型及战略型。不同国家和类型大科学的投入费用 ANOVA 检验不显著。本文研究命题 3c 得到验证。

3. 大科学规模与创新的回归分析。如表 11 所示，通过对模型 2 检验发现，投入费用与技术创新之间无显著相关，创新规模、外部压力均对技术创新影响显著，创新规模与外部压力对技术创新的影响系数分别为 0.492 和 0.370，R^2 为 0.378，创新规模与外部压力的 VIF 为 1.000、1.000，说明此模型具有较好解释水平，且无共线性问题。本文研究命题 2d、命题 3a、命题 3b 得到验证。

表 10　不同国家及类型的大科学的 ANOVA 检验

分组类型			变量	均值差	标准误	Sig	95% 置信区间	
							下限	上限
国家	原苏联(俄罗斯)	中国	技术创新	0.969 *	0.315	0.059	−0.021	1.960
	原苏联(俄罗斯)	日本		1.202 *	0.389	0.057	−0.021	2.425
类型	科学型	产业型	创新规模	−0.711 *	0.274	0.039	−1.392	−0.030
	科学型	战略型	外部压力	−2.146 *	0.157	0.000	−2.537	−1.755
	科学型	产业型		−1.211 *	0.164	0.000	−1.618	−0.804
	战略型	产业型		0.935 *	0.133	0.000	0.603	1.266
	科学型	战略型	技术创新	−0.896 *	0.229	0.001	−1.465	−0.327
	科学型	产业型		−0.782 *	0.238	0.006	−1.375	−0.189

表 11　技术创新模型的回归检验

模型		非标准化系数		标准系数	T	Sig	VIF	R^2
		B	标准误差					
模型 2	(常量)	0.810	0.073	—	11.046	0.000	—	0.378
	创新规模	0.446	0.074	0.492	6.048	0.000	1.000	
	外部压力	0.335	0.074	0.370	4.545	0.000	1.000	
模型 3	(常量)	0.810	0.072	—	11.259	0.000	—	0.407
	创新规模	0.552	0.088	0.609	6.293	0.000	1.469	
	外部压力	0.349	0.073	0.385	4.799	0.000	1.008	
	相乘项	0.224	0.105	0.207	2.139	0.035	1.476	

4. 外部压力对大科学创新规模与技术创新的调节分析。通过对模型 3 检验发现，增加创新规模与外部压力相乘项后各项解释变量对技术创新影响均显著，创新规模、外部压力及相乘项对技术创新的影响系数分别为 0.609、0.385 和 0.207，R^2 为 0.407，VIF 均小于 10，说明外部压力增强对大科学创新规模与技术创新关系。如图 13 所示，高低外部压力分组的斜率分别为 0.776 及 0.324。本文研究命题 2f、命题 3c 得到验证。

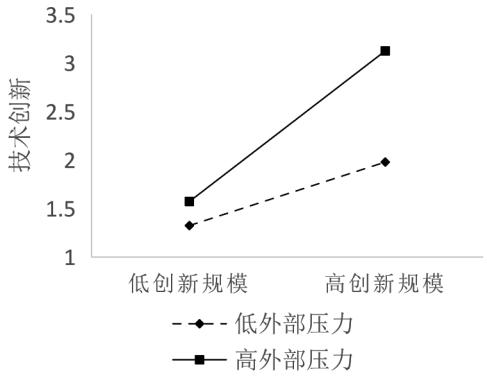


图 13　外部压力对创新规模与技术创新的调节作用

5. 不同国家的大科学投入强度与经济增长的 t 检验。通过对美国与原苏联两组数据 t 检验，如表 12 所示。美国投入强度的均值和标准差分别为 0.458 和 0.189，原苏联投入强度的均值和标准差分别为 2.150 和 0.777；美国经济增速的均值和标准差分别为 3.51 和 2.337，原苏联经济增速的均值和标准差分别为 3.940 和 7.481。由此可知，美国与原苏联的投入强度与经济增长均有显著区别。本文研究命题 1a、命题 1b 得到验证。

表 12　美国与原苏联大科学投入强度与经济增速的 t 检验

变量	国家	均值	标准差	均值的标准误	P
投入强度	美国	0.458	0.189	0.060	0.015
	原苏联	2.150	0.777	0.183	
经济增速	美国	3.51	2.337	0.739	0.010
	原苏联	3.940	7.481	1.763	

6. 大科学投入强度与经济增长的回归分析。如表 13 所示，投入强度与经济增长不显著，投入强度平方与经济增长显著，系数为 -1.848，R^2 为 0.231，VIF 小于 1，说明经济增长与投入强度之间呈显著倒 U 型关系，模型无共线性问题，具有一定的解释水平。当投入强度为 1.545 时，经济增速出现 U 型曲线拐点。本文研究命题 3d 得到验证。

表 13　大科学投入强度与经济增长的二项式回归

模型		非标准化系数		标准系数	T	Sig.	VIF	R^2
		B	标准误差					
模型 3	（常量）	5.626	1.909	—	2.946	0.007	—	0.231
	投入强度	0.048	1.173	0.008	0.041	0.968	0.773	
	投入强度^2	-1.848	0.761	-0.484	-2.427	0.023	0.773	

（二）仿真分析

1. 模型及变量说明。系统动力学可以通过质性研究构建仿真模型，通过对系统变量及时间范围确定系统约束及边界，检验系统模型的重要概念及机制，同时检验系统行为对不同初始变量的敏感性[39-40]。本文基于大科学的内外部系统动力结构，采用 VemsimPLE 9.3 构建相应系统动力的仿真模型，如图 14 所示。根据仿真模型构造对应变量及方程，如表 14 所示。参照各国的实际情况设置变量初始值及参数值，分析大科学投入、技术创新、产业、经济发展、科研院所以及人才培养的动态关系，并以高战略型及科学型大科学投入、高产业型及科学型大科学投入、低战略型及科学型大科学投入、产业及技术基础较好、低战略型及科学型大科学投入、产业及技术基础较弱、技术扩散较低等 6 组情况对模型进行敏感性分析。

2. 仿真结果。主要变量及参数设置为：$EC = 15$，$IN = 5$，$IT = 3$，$AIS = 2$，$TA = 2$，$ST = 2$，$BSR = 0.35$，$RI = 0.03$，$IUI = 0.1$，$CUI = 0.1$，仿真结果如图 15 所示。由结果可知，大科学基本成指数函数增长，均在 45 年开始高速增长，由于科学积累增加与科学探索的需求形成正反馈，科学型大科学的增长速度远高于其他两类大科学；技术创新长期处于低速增长，第 47 年开始快速增加；科研院所

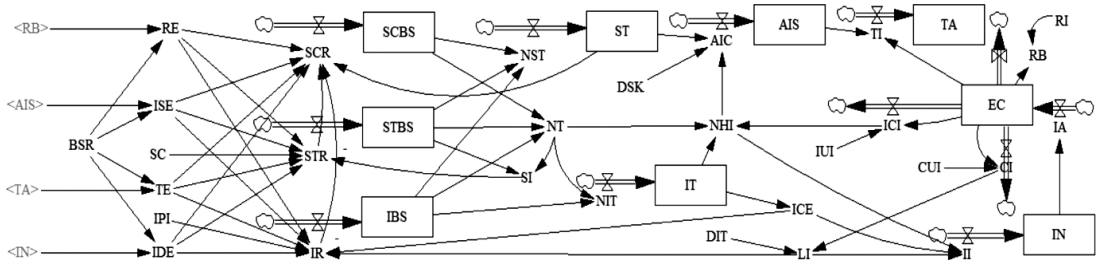
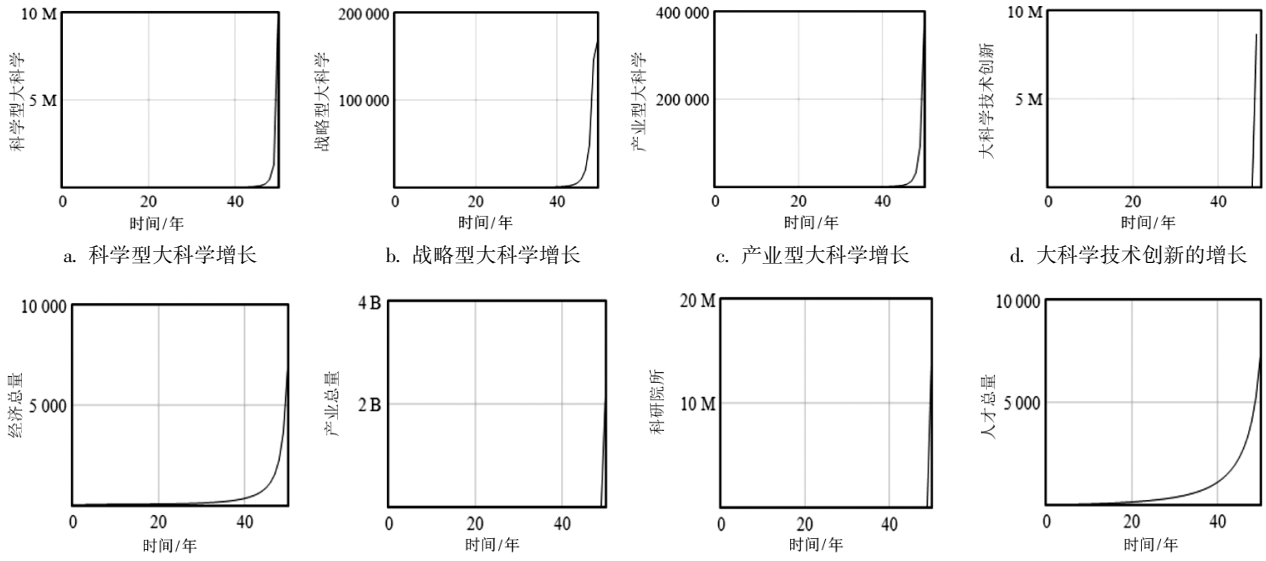


图 14　大科学演化动力仿真模型

表 14　大科学系统动力模型变量说明

变量类型	变量	公式	含义
水平变量	*STBS*	*STBS* = INTEG(*STR*,0)	战略型大科学,初始值为 0
	SCBS	*SCBS* = INTEG(*SCR*,0)	科学型大科学,初始值为 0
	IBS	*IBS* = INTEG(*IR*,0)	产业型大科学,初始值为 0
	AIS	*AIS* = INTEG(*AIC*,2)	研究院所机构及科研能力,初始值为 2
	IT	*IT* = INTEG(*NIT*,3)	产业技术,初始值为 3
	EC	*EC* = INTEG(*IA* − *ICI* − *CI* − *RB*,15)	经济总量,初始值为 15
	IN	*IN* = INTEG(*II*,10)	产业产值,初始值为 10
	TA	*TA* = INTEG(*TI*,2)	人才总量,初始值为 2
	ST	*ST* = INTEG(*NST*,2)	科学理论总量,初始值为 2
速率变量	*SCR*	*SCR* = 0.01 × *ST* × *TE* × (0.3 × *RE*) × *IDE* × *ISE* + 0.3 × *STR* + 0.1 × *IR*	科学型大科学需求
	STR	*STR* = *SC* − 0.5 × *SI* + *IDE* × (0.5 × *RE*) × *ISE* × *TE* × 0.001	战略型大科学需求
	IR	*IR* = *IPI* + *LI* − *ICE* + 0.001 × *ISE* × (0.2 × *RE*) × *IDE* × *TE*	产业型大科学需求
	NIT	*NIT* = (*NT* × 0.01 + *IBS* × 0.5) × 0.1	由大科学创新的技术而转化的新产业技术
	II	*II* = (*NHI* + *LI*) × *ICE*	产业的增长
	IA	*IA* = 2 × *IN*	经济总量的产业增加值
	TI	*TI* = *AIS* × *EC* × 0.01	人才量增长
	AIC	*AIC* = 0.5 × *ST* + 0.2 × *NHI* + 0.3 × *DSK*	科研院所研究能力增长
	RB	*RB* = *EC* × *RI*	研发预算
	ICI	*ICI* = *EC* × *IUI*	新兴战略产业孵化投资
	CI	*CI* = *EC* × *CUI*	后发产业追赶投资
	NST	*NST* = (0.01 × EXP(*SCBS* × 1e − 05) + 0.001 × EXP(*STBS* × 1e − 05) + 0.001 × EXP(*IBS* × 1e − 05)) × 0.0005	大科学中新发现科学理论
辅助变量	*ICE*	*ICE* = *IT* × 0.01	产业竞争力
	IDE	*IDE* = *BSR* × *IN*	参与大科学建设的产业
	ISE	*ISE* = *AIS* × *BSR*	参与大科学建设的科研院所
	RE	*RE* = *RB* × *BSR*	大科学建设投入
	TE	*TE* = *BSR* × *TA*	参与大科学建设的人才量
	NHI	*NHI* = 1e − 05 × *NT* × *IT* × *ICI*	由新技术孵化的高新产业
	SI	*SI* = 0.1 × *NT* + 0.2 × *STBS*	大科学创新的战略技术
	LI	*LI* = *DIT* × *CI*	后于扩散产设的后发产业
	NT	*NT* = (0.1 × (EXP(*SCBS* × 1e − 05)) + 0.6 × (EXP(*STBS* × 1e − 05)) + 0.3 × (EXP(*IBS* × 1e − 05))) × 5e − 05	大科学组合创新的新技术
常量	*DIT*	—	外部产业技术扩散
	DSK	—	外部科学知识扩散
	IUI	—	新兴战略产业孵化投资强度
	CUI	—	后发产业追赶投资强度
	RI	—	研发强度
	SC	—	外部战略竞争
	IPI	—	外部产业竞争
	BSR	—	大科学投入占国家全部研发资源的比例



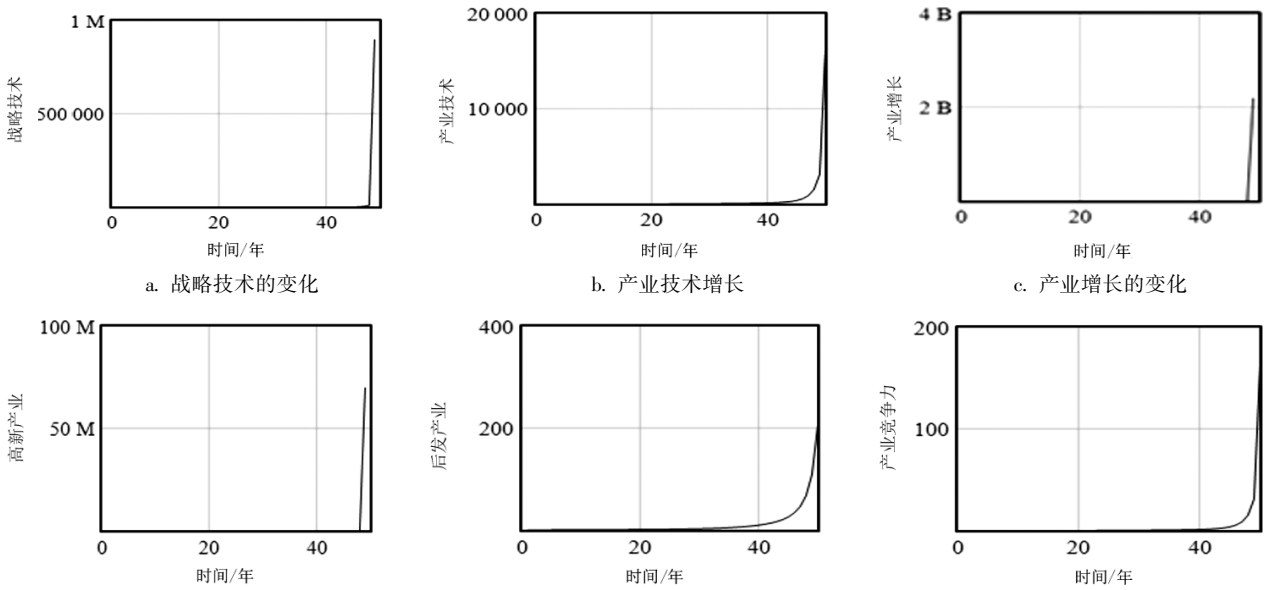
a. 科学型大科学增长　b. 战略型大科学增长　c. 产业型大科学增长　d. 大科学技术创新的增长

e. 经济总量增长　f. 产业总量增长　g. 科研院所增长　h. 人才总量增长

图 15　主要系统变量的仿真结果

早期基本成线性增长,第 48 年开始高速增长;人才增长快速指数增长;经济长期缓慢增长,第 35 年后由于产业及技术创新的指数增长带动快速增长。可见,经济增长长期由重大技术创新驱动,技术创新的增长速度需要时间积累才能进入高增长阶段。

3. 动力机制分析。由图 15a、图 15b、图 15c、图 15d 可见,虽然大科学以指数函数增长,但是技术创新在较长时间内的增长速度较低,第 45 年以后才开始快速增长;由图 16a、图 15b、图 15d 可见,战略技术增长与战略大科学及技术创新增长同步,具有指数函数增长趋势;由图 16b、图 15d、图 15c 可见,产业技术的快速增长主要由产业型大科学推动,形成技术的快速组合和扩散,早期新技术的组合增长较慢,到第 45 年以后快速增长,成为产业技术增长的主要动力;由图 16c、图 16d、图 16e、图 16f 可见,产业增长与产业竞争力基本以指数函数增长,早期主要由后发产业追赶贡献;经济增长推动研发投入增加,而研发投入、科研院所、人才数量、产业规模也成为大科学投入的主要约束条件。



a. 战略技术的变化　b. 产业技术增长　c. 产业增长的变化

d. 高新产业增长　e. 后发产业增长　f. 产业竞争力的变化

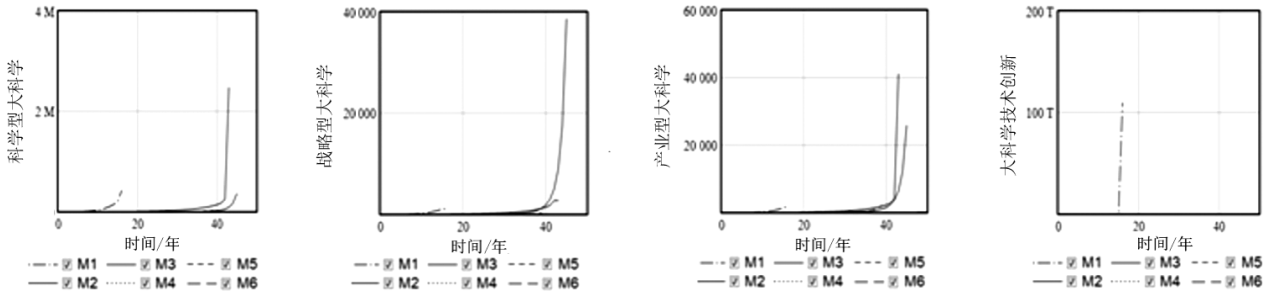
图 16　主要动力机制的仿真结果

4. 敏感度分析。通过不同经济、产业、产业技术、人才、科研院所、研发强度、大科学投入比例等初始条件,分析不同国家和地区的典型大科学演化路径,检验系统敏感性。①高战略型及科学型大科学投入,具有较高的经济、科技、产业和人才积累,如表 15 中模型 M1 和模型 M2。如图 17 所示,虽然以战略大科学为主,但产业大科学的增长速度仍然高于战略型大科学,科学型大科学增长速度远高于其他两种大科学,对于经济和产业基础相对较弱的国家,经济和产业发展严重抑制,延迟经济的高速增长,而相对于综合条件强的国家,由于技术创新指数曲线的高速增长,带动经济和产业高速发展,基本接近冷战期间美国和原苏联情况。②中等战略型及科学型大科学投入、产业及技术基础较好,具有较高的科技和人才积累,经济、产业相对落后,见表 15 中模型 M3。虽然初期主要以战略大科学为主,但产业大科学的增长速度仍然高于战略型大科学,科学型大科学增长速度远高于其他两种大科学,接近 20 世纪 70 年代以后英国和法国 M3 的情况。③中等战略型及科学型大科学投入、产业及技术基础较弱,经济、科技、产业和人才积累全面落后,见表 15 中模型 M4。由于大科学的投入资源较高,虽然基本实现了战略需求,经济和产业发展长期滞后。④高产业型及科学型大科学投入,具有较高的科技和人才积累,经济、产业相对落后,见表 15 中模型 M5。由于经济和产业快速发展,虽然早期战略型大科学投入较低,但随着经济和产业的全面发展,后期的增长远高于其他模式,此模式比较接近战后日本和德国的情况。⑤低战略型及科学型大科学投入、产

业及技术基础较好,具有较高的科技和人才积累,经济、产业相对落后,见表 15 中模型 M6。虽然初期主要以战略大科学为主,但产业大科学的增长速度仍然高于战略型大科学,科学型大科学增长速度远高于其他两种大科学。可见,通过 6 组不同的经济、产业、科研院所、技术、人才等约束条件,形成不同的大科学演化路径,大科学的投入规模决定大科学与技术创新、产业、经济之间相互促进的水平,大科学的适度投入可以有效促进产业经济增长。同时,不同约束条件下的大科学演化动力具有一致性,虽然大科学的增长受经济、产业、科研院所及人才总量的约束,但大科学技术创新等变量均持续增长,并通过一定时间积累后会高速增长。仿真结果进一步验证了大科学技术创新规模效应以及与产业和经济之间的动力机制。

表 15　不同系统动力模型及初始参数

模型	*SC*	*IPI*	*EC*	*IN*	*IT*	*AIS*	*TA*	*ST*	*DIT*	*BSR*	*RI*	*IUI*	*CUI*
M1	2	0. 1	100	30	5	5	5	5	0. 2	0. 7	0. 03	0. 10	0. 01
M2	2	0. 1	30	10	3	2	2	2	0. 2	0. 7	0. 05	0. 05	0. 01
M3	1	1	15	10	3	2	2	2	0. 3	0. 3	0. 03	0. 07	0. 07
M4	1	0. 1	10	1	1	1	1	1	0. 2	0. 7	0. 1	0. 05	0. 05
M5	0. 5	1	10	7	3	2	2	2	0. 3	0. 3	0. 03	0. 1	0. 1
M6	1	1	10	7	3	2	2	2	0. 15	0. 3	0. 03	0. 1	0. 1

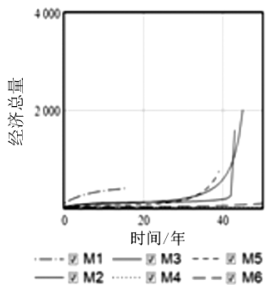


a. 科学型大科学增长

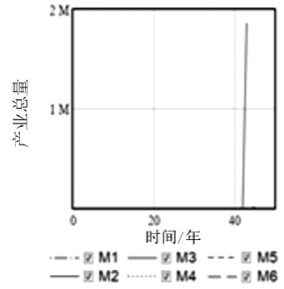
b. 战略型大科学增长

c. 产业型大科学增长

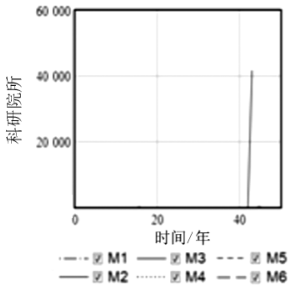
d. 大科学技术创新的增长



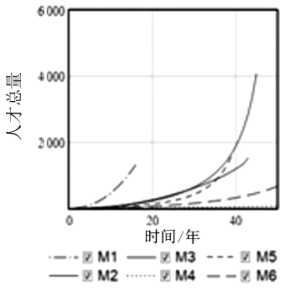
e. 经济总量增长



f. 产业总量增长



g. 科研院所增长



h. 人才总量增长

图 17　不同初始条件下大科学演化的仿真结果

(三)讨论与分析

1. 大科学的技术创新范式。大科学中不同要素组合形成科学—科学、科学—技术、技术—技术等不同创新:①科学—科学组合主要以科学创新为主,但大科学的前期建设需要由企业完成,由此形成了需求引导创新。大科学的需求引导创新本质上是通过科研院所对企业的技术需求而实现科学向技术的扩散,即科研机构作为用户与企业作为创新主体之间互动的经验创新(DUI)模式[41]。②科学—技术组合通过科学与技术的双向扩散和转化,实现技术创新和科学创新,其中科学向技术转化过程是典型的科学技术创新(STI)模式[41]。另外,存在技术向科学的扩散,以美国斯坦福大学—洛克希德马丁、MIT - 贝尔实验室、MIT - IBM、加州大学—波音等合作为例,产业技术也快速向这些大学和研究机构扩散,从而提高大学和研究所的创新能力。③技术—技术组合主要以企业的联合创新为主,日本半导体计划中通过引入尼康和佳能等光学技术企业,加快半导体光刻设备和技术的突破。另外,大科学聚集导致 3 种范式

的技术创新以及科学创新的增加,从而形成产学研的创新生态。可见,大科学技术创新范式通过组织的组合实现创新要素的组合以及技术创新,进一步完善 STI、DUI、创新组织、创新生态理论。

2. 大科学技术创新的规模效率。主要包括组合创新的指数增长、创新压力对创新效率调节以及颠覆式创新涌现 3 个方面:①大科学技术创新的指数增长,创新规模越大组合数量越多、效率越高。创新链条中前一环节的新增创新导致下一环节的组合空间倍增,进而形成基础研发、技术应用、产品开发的创新规模的级数增加。同样地,由于技术的指数增加,也导致产品的技术集成度和复杂度更高。②大科学的外部压力和饱和激励[38]为技术创新效率逼近指数曲线提供了必要条件,在两弹一星、华为核心网、MIT 雷达、臭鼬工厂、鬼怪工厂、日本半导体等研制计划中,均发现外部压力下个体和组织创新效率的巨大提升。③大科学的外部压力和饱和激励[38]也促使颠覆式创新在技术组合创新中涌现。经过大科学的长期的规模投入和技术持续进步,微型粒子加速器、亚轨道航空器、快速核能、核聚变、生物基因等技术接近产业化和实用化,新一轮科技和产业革命逐步进入临界状态。战后,英国在科学获得较大成就,获得较高数量的诺贝尔奖,但经济发展仍然低于德国和日本,科学技术的产业转化失效,进一步导致创新动力不足和人才流失。德国和日本虽然技术积累较好,仍然引进国外技术并通过产业大科学加速基础产业创新,先后实现钢铁、造船、化工、家电、消费电子、汽车等产业的技术升级和领先,逐步向半导体、计算机、航空、核能等高科技领域全面展开。

3. 大科学的动力机制。大科学通过大规模投资形成大学、科研院所、企业的聚集与合作动力,同时通过较高的创新需求和外部压力促使产学研的紧密合作,进而形成技术创新的规模效率,同时在合作过程中完成科学和技术在不同创新主体之间的扩散;大科学技术创新的规模效率,进一步推动技术创新以大科学为核心,形成科研院所与企业技术创新能力提升和规模扩大,加快技术创新高速增长临界点的出现,从而带动产业升级和经济增长,形成科学、技术、产业、经济的指数型增长;质性研究和仿真分析均发现,不同国家和地区的约束条件形成不同的大科学与经济的演化模式,实证研究进一步证实大科学投入强度与经济发展之间的倒 U 型的关系。可见,大科学创新范式有效解释了技术创新的规模效率,规模效率的指数型增长也形成了对技术创新规模扩大的激励;大科学的大规模投入和创新扩散形成对科研机构和企业的激励,而技术创新进一步对产业和经济形成有效激励,构成大科学的聚集—创新—扩散—产业升级—经济增长—再聚集的增强回路,实现大学、科研机构、产业、经济的帕累托改进。因此,大科学的动力机制可以进一步解释不同组织模式、三螺旋理论以及创新生态中不同主体的合作创新动力机制,对于不同国家和地区的大科学演化均具有较好的解释能力。

4. 大科学的竞争与技术预见。二战期间,德国虽然在喷气式战机、火箭、雷达、原子弹等战略武器拥有较高优势,但面对美国的大规模工业和研发竞争,无法取得战略竞争优势,并逐步丧失技术优势;原苏联与美国竞争中,战略型大科学的领先优势同样无法取得全面竞争优势。可见,国家竞争优势无法仅由科技和战略优势决定,在实现基本战略安全后,产业和经济决定国家的竞争优势,从仿真结果也证实片面追求科技领先却导致整体实力的落后。对于日本和德国等资源匮乏和国内市场狭小的国家来说,产业竞争更加需要通过科技优势来提高产品竞争力,从而获取全球市场提高国家经济实力,一旦资源或外部市场受限,科技创新投入的经济反馈回路将出现断裂,进一步制约科技的持续发展。战后,日本和德国重点建设产业型和科学型大科学,推动科技和经济的快速发展,但面对美国的竞争和打压,只能通过科学型大科学进一步提高产业的科技含量,进入上游高新材料、精密仪器等细分领域,避免与美国产业的正面激烈竞争。虽然战略技术和产业技术具有高度竞争性,但相关理论和雏形技术仍然会在早期扩散。二战期间,德国、英国、原苏联、美国等国均开展了不同规模的核武器理论和技术研究,通过科学研究的前沿跟踪和交流获取相关知识。另外,通过人才扩散也可以获得更多信息,美国曼哈顿计划主要人才如爱因斯坦、费曼等甚至来自敌对国家,英国也为美国核武器研制提供 50 多名

核物理科学家;多数技术如雷达、喷气式战机仍然可以通过产品扩散,后发国家可以通过大规模研发快速实现追赶。因此,通过基础研究、人才交流和产品扩散可以提高对战略技术的预见,而拥有大规模科研、产业和人才体系也可以快速实现后发追赶。

5. 杰出人才培养与使用。仿真发现人才的高速增长早于技术、产业以及经济的高速增长,经过长期和大规模的人才培养,才涌现科技创新、产业和经济的高速发展。德国自 19 世纪开始长期投入中高等教育,在 20 世纪初基本普及中等教育并建立现代大学院系体制,为德国培养了世界最大规模的科学、技术和产业人才,并通过学术研究的工业化迅速提升了德国的科学声誉,1900—1933 年间共获得 28 次诺贝尔奖,遥遥领先于其他国家,同时在化工、电气、无线电、机械、航空等新兴产业领域也居世界领先地位。由于科学和技术积累通过人才得以延续,即使德国经历两次世界大战的摧毁,仍然可以快速崛起。日本战前基本实现中等教育普及,初步建立以大学、国立研究所、企业实验室为主的规模研发体系,为日本快速追赶欧美技术和经济发展提供了坚实基础。战后海军技术研究所、产业技术研究所等机构的技术和人才积累推动了电子、化工、汽车等产业的快速进步,如索尼、NEC、富士通等企业创始人和核心技术人员也主要来自海军技术研究所,佳能、丰田、东芝、日立等企业通过战争期间的产学研合作项目实现了大量技术积累。美国在二战之前建立了规模庞大的高等教育体系,经过曼哈顿、雷达工程、战略轰炸机等大科学工程,加速杰出了人才的引入和培养,而战后的大科学投入聚集了全球最大规模的杰出人才。战后,原苏联大规模的科技投入,也推动了科学技术和杰出人才的井喷式增长。新中国成立初期人才其匮乏,甚至连火箭研发的几百名专家都很难凑齐,虽然经过大学毕业生的快速补充,人才和技术的积累仍然不是短期能够完成,大量杰出人才体系仍然需要通过大量的重大项目的积累后才逐渐培养出来。可见,通过大科学的高创新需求促进杰出人才成长,优秀人才汇聚后经过合作和交流,“用最优秀的人去培养更优秀的人”(华为访谈记录),进一步加速了杰出人才规模的快速成长。

6. 新型科技创新举国体制及核心技术后发追赶。通过大科学的技术创新效率、组织模式、创新范式、动力机制可以进一步厘清大科学的内涵及边界,确保大科学建设能够聚焦关键核心技术问题,满足国家战略和产业经济发展需要,并与经济发展相互促进。新中国成立初期,在极端困难情况下,通过艰苦奋斗、自主创新,集中全国力量成功建设两弹一星等重要大科学工程,有效实现了国家战略安全,也探索出符合中国国情的重大工程的建设路径和组织模式,对于中国的高水平科技自立自强和经济高质量发展具有重要意义。当前,中国拥有全球最大规模的科技人才体系、工业体系以及每年 1 000 万左右的大学毕业生,创新投入不断增加[42],科学论文和人才数量均已达到全球领先水平,5G、高铁、核电、特高压、新能源等产业实现了核心技术突破和后发追赶,但技术创新效率却不断下降[43],仍然存在如半导体制造、高精度机床、高新材料等领域关键核心技术的“卡脖子”现象,严重制约经济和产业的安全和可持续发展。从组合创新视角看,虽然中国有效实现科学—科学组合,但科学—技术以及技术—技术的组合不足。从技术创新的规模效率看,科研院所缺乏重大工程支撑,创新规模不足而且多配置在科学创新,导致科学向技术转化动力和效率不足,虽然整体规模较高,但仍然没有形成大规模组织和指数型增长。从技术创新动力看,中国的产业技术水平较低,通过中低端产品的数量获取利润,无法支撑大规模研发组织,很难承担核心技术研发,同时也没有形成对高端技术和人才的有效需求,仍然停留在对人力成本的片面追求,出现“35 岁 +”等现象,非常不利于现代高科技产业的复杂性和长期积累的要求。可见,新型科技创新举国体制,首先,需要根据国家发展战略和经济社会需要,并立足于国家当前的科技、产业、人才和经济等基础条件,充分利用两弹一星和载人航天等大科学的重要经验,通过大科学建设集中力量解决关键核心技术,实现科技创新的自立自强,推动以大科学为核心的大规模研发体系的涌现,提高技术创新的规模效率;其次,通过提高大科学建设规模,为企业技术创新提供有效技术需求和市场,优化中国大规模市场对技术创新的推动动力;最后,从仿真结果

看,持续投入均出现科技指数型增长,但需要稳定市场和制度环境,应避免出现日本式中断和原苏联式崩溃,进一步优化大科学建设的结构和效率,实现科技、产业、经济的协调发展。

六、结论及建议

(一)主要结论

通过不同国家和地区大科学的演化过程研究,分析大科学技术创新的主要条件、系统动力、创新范式和演化机制,得到以下主要结论。

1. 大科学技术创新的主要条件。大科学技术创新的外部条件包括强大的战略竞争、产业竞争以及前沿探索构成的大科学建设需求,进而进行大规模和密集的资源投入,包括多层次的人才体系、强大的产业体系及经济基础;由于大科学建设规模和投入不断增加,国家和地区的人才数量、产业规模以及经济总量也成为大科学建设的边界条件;大科学建设需要具备必要的理论和技术基础,降低大科学技术创新的不确定性,通过有效组织提高大科学的组合创新效率,通过企业参与提高技术创新的经济效益。

2. 大科学技术创新的系统动力。战略竞争、产业竞争以及科学探索为大科学建设提供外部需求,因而国家和社会的需要形成大科学发展的直接动力;大科学通过大规模资源聚集实现了技术创新与扩散、人才培养,并通过需求拉动推动产业的孵化,以及技术创新推动产业技术升级,进一步推动经济的繁荣,从而形成大科学的外部增强回路;通过系统工程实现大科学的复杂性的降解,研究问题与组织的规模、不确定性、复杂性以及大科学的组合创新构成大科学的内部增强回路。

3. 大科学技术创新范式。大科学存在需求式创新、组合式创新、颠覆式创新 3 种主要技术创新范式。需求式创新,通过对产业的大量先进技术需求促进新技术创新、产业孵化;组合式创新,通过多路径探索以及系统化组织分工,实现不同研究路径的覆盖以及组合创新的规模效率,降低科学研究对资源及热点问题的盲目竞争;颠覆式创新,外部的资源投入和竞争转化为大科学建设的强大动力和压力,促进多个前沿领域的激烈碰撞和充分交流,推动颠覆式创新的涌现。

4. 不同国家和地区的大科学演化路径。不同国家和地区大科学的要素条件、投入水平和创新方式,形成大科学对产业和经济的不同作用效果,进而演化为不同的路径和模式。美国大科学与技术、产业相互促进和共同繁荣形成硅谷模式,冷战结束后由于外部压力消失,导致的内部动力机制不足,虽然整体投入增加,却缺少颠覆性创新出现。原苏联由于战略竞争被迫过多大科学建设,产业转化和经济带动作用较小,大量投入反倒抑制了经济发展。日本和欧洲缺少战略竞争,大科学建设主要源于产业竞争和科学探索。日本产业大科学直接推动半导体、计算机等产业的升级,在受到美国激烈打压后,通过大量科学型大科学建设带动新材料、精密制造等行业的全球领先;欧洲通过大科学建设实现地区科学和经济的合作,实现创新资源有效聚合和技术创新的规模效率。中国通过早期战略大科学建设实现战略安全后,采取有限投入实现大科学与经济社会的均衡发展,在实现经济增长后不断提高大科学投入和后发追赶进度。

(二)理论贡献和实践意义

(1)本文从系统演化视角建立大科学技术创新的系统动力机制,提出大科学技术创新的主要条件,包括人才、产业及经济基础等外部条件以及理论和技术基础、有效组织分工等内部条件,并进一步提出大科学的边界条件。

(2)相对于此前的大科学的产学研以及组织管理研究[3,12,19-20],本文进一步探讨大科学的研究问题及组织的不确定性、复杂性、规模等因素的系统动力,从技术创新和组织分工分析大科学的内在机制。

(3)提出大科学技术创新范式,并分析由组合创新到颠覆式创新的涌现机制。

(4)以往的研究对于创新生态关于大科学的产学研繁荣的内在机制研究不足[6],本文通过不同国家和地区的大科学技术创新条件以及范式分析,进一步提出大科学技术创新路径的动力机制,解释了美国硅谷、原苏联、日本和欧洲等国家和地区不同大科学演化的内在机制。本文从大科学技术创新的主要条件、系统动力、创新范式以及演化路径深化了大科学创新理论,对于中国当前的大科学建设以及新型科技举国体制的完善具有重要的实践意义。

(三)政策建议

当前,中国产业升级和经济安全面临重大外部挑战,也面临新一轮产业技术革命的重大机遇,大科学建设对于中国的高水平科技自立自强、保障国家经济安全、建设世界科技强国均具有重大意义。因而,基于本文研究结论提出以下政策建议。

1. 从大科学技术创新动力机制看:大科学建设应充分发挥有限科研资源的建设效益,优先满足国家战略和产业安全需要,把国家战略和产业技术安全有效转化为大科学的外部需求和压力,集中力量解决高端装备制造、半导体、新材料、精细化工、生物等基础产业中制约国家战略和经济发展的关键核心技术问题;通过大科学建设逐步提高人才培养水平、科学仪器设备的自主研发和制造、超大规模科学工程的组织能力;进一步优化不同类型大科学建设的结构和综合效益,形成大科学建设、人才培养、产业经济的相互促进;大科学建设不应超出经济和社会的承受能力,应立足于自主创新与核心能力提升,避免对国外核心技术的过度依赖。

2. 从大科学技术创新的主要条件看:中国的经济和社会发展需要大科学提供进一步的科技支撑,同时中国具备大科学建设的比较优势,包括全球最大规模的人才队伍、门类齐全的产业体系、全球最大规模的国内市场以及部分初具全球竞争力的优势产业和技术,通过增加大科学建设规模和水平,聚焦和突破关键核心技术和科学前沿,有利于中国产业的升级转型和经济的可持续发展,同时也会增加对杰出创新人才的培养和需求;产业型大科学应由企业主导,依托企业成立工业实验室,加快解决制约企业的核心技术,鼓励企业组织大规模创新;推动科学研究、技术创新和产业发展的紧密结合与协同创新,确立以企业为技术创新主体,以高校和研究所为科学创新主体。

3. 从大科学技术创新范式看:中国需要持续增加大科学研究的资源投入强度,实现大科学的聚焦功能,通过大科学的组合创新和颠覆式创新,提高科技创新的规模效率和重大创新的涌现概率;进一步提高大科学作为市场对产业技术的引导作用,即通过大科学的领先知识和技术需求带动企业技术研发,促进技术转化、新产业孵化以及升级;大科学建设应增加对国产供应商的采购,与产业界共同建设大科学所需的仪器设备,并通过大科学建设的极端需求带动产业技术的提高,实现大科学设备装备能力的提高和技术能力的提升,带动产业技术进步和经济发展,形成大科学与经济社会的良性互动。

4. 从大科学演化过程看:中国目前的大科学虽然取得了巨大成就,但由于中国整体的投入规模和水平偏低,与美、欧、日等仍然存在一定差距,仍然需要增加投入并优化不同大科学建设的结构,缩小与世界先进水平的差距;大科学建设并不会必然出现类似硅谷的产学研繁荣,新技术产业能否持续成长并带动经济增长还取决于市场需求,大科学建设的热带雨林效应的条件是在战略研究、科学探索、产业技术与经济发展形成增强回路,需要在产业和经济不断发展的前提下持续提高大科学建设的投入水平,同时加快大科学中衍生技术的产业转换和扩散,提高大科学对产业和经济的带动作用。

参考文献:

[1]麦强, 陈学钏, 安实, 等. 重大航天工程系统融合原理、模型及管理方法[J]. 管理世界, 2021, 37(2):214-224, 15.

[2]赵耀升, 宋立丰, 毛基业, 等."北斗"闪耀:初探中国卫星导航产业发展之道[J]. 管理世界, 2021, 37(12):217-237.

[3]寇明婷, 邵含清, 杨媛棋. 国家实验室经费配置与管理机制研究:美国的经验与启示[J]. 科研管理, 2020, 41(6):280-288.

[4]常旭华, 仲东亭. 国家实验室及其重大科技基础设施的管理体系分析[J]. 中国软科学, 2021(6):13-22.

[5]陶迎春, 胡业生. 小科学与大科学关系视角下的美国科学[J]. 科学学研究, 2012, 30(5):660-666.

[6]黄振羽. 基于大科学设施的创新生态系统建设:"雨林模型"与演化交易成本视角[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(19):9-16.

[7]雷丽芳, 潜伟, 吕科伟. 科技举国体制的内涵与模式[J]. 科学学研究, 2020, 38(11):1921-1927, 2096.

[8]ANDERSEN P H, ABERG S. Big-science organizations as lead users: a case study of CERN [J]. Competition and change, 2017, 21(5):345-363.

[9]张广翔, 张文华. 苏联赶超型的核工业发展政策:以乌拉尔地区为例[J]. 俄罗斯研究, 2018(5): 97-142.

[10]PRICE D J. Little science big science [M]. New York:

Columbia University Press, 1963: 1-32.
[11] LENFLE S, SODERLUND J. Large-scale innovative projects as temporary trading zones: toward an interlanguage theory [J]. Organization studies, 2019, 40(11):1713-1739.
[12]刘云, 桂秉修, 马志云, 等. 国家重大工程背景下的颠覆性创新模式探究[J]. 科学学研究, 2019, 37(10): 1864-1873.
[13]章琰, 朱英, 郑晓齐. 重大关键核心技术中的"衍生小技术":以双光子 STED 复合显微镜项目为例[J]. 科学学研究, 2021, 39(5):876-881.
[14]萨克森宁. 地区优势:硅谷和 128 公路地区的文化与竞争[M]. 温建平, 李凌, 译. 上海:上海科学技术出版社, 2020:11-62, 92-115.
[15]路风. 冲破迷雾:揭开中国高铁技术进步之源[J]. 管理世界, 2019, 35(9):164-194, 200.
[16]敦帅, 陈强, 陈力, 等. 重大科技基础设施运行效益影响机制研究:基于"投入—产出"视角的定性比较分析[J]. 中国软科学, 2021(4):11-21.
[17]王婷, 陈凯华, 卢涛, 等. 重大科技基础设施综合效益评估体系构建研究:兼论在 FAST 评估中的应用[J]. 管理世界, 2020, 36(6):213-236, 255.
[18]张艺, 陈凯华. 官产学三螺旋创新的国际研究:起源、进展与展望[J]. 科学学与科学技术管理, 2020, 41(5): 116-139.
[19]陈宏权, 曾赛星, 苏权科. 重大工程全景式创新管理:以港珠澳大桥工程为例[J]. 管理世界, 2020, 36(12): 212-227.
[20]曾赛星, 陈宏权, 金治州, 等. 重大工程创新生态系统演化及创新力提升[J]. 管理世界, 2019, 35(4):28-38.
[21]潘铁, 柳卸林. 日本超大规模集成电路项目合作开发的启示[J]. 科学学研究, 2007, 25(S2):337-344.
[22] HALLONSTEN O. Research infrastructures in Europe: the hype and field [J]. European review, 2020, 28(4): 617-635.
[23]钱学森等. 论系统工程(新世纪版)[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2007:20-36, 51-62.
[24]贺新闻, 王艳. 大规模科学技术工程管理模式架构分析[J]. 中国科技论坛, 2012(7):14-19.
[25] JACOB M, HALLONSTEN O. The persistence of big science and megascience in research and innovation policy [J]. Science and public policy, 2012, 39(4):411-415.
[26] HILTZIK M. Big science: ernest Lawrence and the invention that launched the military-industrial complex [M]. New York: Simon & Schuster Press, 2015:45-80.
[27] ARTHUR W B. The structure of invention [J]. Research policy, 2007, 36(2):274-287.
[28]牛杰. 新中国航空建制的大科学性与系统性[J]. 系统科学学报, 2017, 25(4):75-77.
[29] D'IPPOLITO B, RULING B B. Research collaboration in large scale research infrastructure collaboration types and policy implications [J]. Research policy, 2019, 48(5):1282-1296.
[30] WHITTAKER D H, COLE R E. Recovering from success: innovation and technology management in Japan [M]. New York: Oxford University Press, 2007: 35-46, 70-86.
[31] MARTIN J A, EISENHARDT K M. Rewring: cross-business-unit collaboration in multibusiness organizations [J]. Academy of management journal, 2010, 53(2):265-301.
[32] YIN R K. Case study research: design and methods(5th Edition)[M]. CA: Sage, 2014: 215-221.
[33]毛基业. 运用结构化的数据分析方法做严谨的质性研究:中国企业管理案例与质性研究论坛(2019)综述[J]. 管理世界, 2020, 36(3):221-227.
[34] ELZINGA A. Features of the current science policy regime: viewed in historical perspective [J]. Science and public policy, 2012, 39(4):416-428.
[35] HALLONSTEN O. Use and productivity of contemporary, multidisciplinary big science [J]. Research evaluation, 2016, 25(4):486-495.
[36] BANEKE D. Let's not talk about science: the normalization of big science and the moral economy of modern astronomy [J]. Science, technology, & human values, 2020, 45(1):164-194.
[37] PETERSEN A M, PAVLIDIS I, SEMENDEFERI I, et al. A quantitative perspective on ethics in large team science [J]. Science and engineering ethics, 2014, 20(4):923-945.
[38]张毅, 闫强. 企业核心技术创新的激励结构分析[J]. 科学学研究, 2022, 40(5):938-949.
[39] STERMAN J D. Business dynamics systems thinking and modeling for a complex world [M]. New York: McGraw-Hill, 2000:83-104.
[40]钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. 系统动力学[M]. 北京:科学出版社, 2013:19-36.
[41] SCHOT J, STEINMUELLER W E. Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change [J]. Research policy, 2018, 47(9):1554-1567.
[42]孙早, 许薛璐. 前沿技术差距与科学研究的创新效应:基础研究与应用研究谁扮演了更重要的角色[J]. 中国工业经济, 2017(3):5-23.
[43]叶祥松, 刘敬. 异质性研发、政府支持与中国科技创新困境[J]. 经济研究, 2018, 53(9):116-132.

(本文责编:辛　城)