

创新模式与大科学装置的科技成果产业化

吴月佳, 柯遵科*

中国科学院大学 人文学院, 北京 100049

摘要: 线性模式、二维象限模型、三螺旋模型和发明-发现循环模型是创新模式的四种基本类型。大科学装置的科技成果产业化是推动科技创新和产业升级的重要途径, 其中平台型或应用支撑型装置在促进战略性新兴产业发展中发挥着关键作用。本研究通过对四种经典创新模式的理论分析, 结合具体案例, 揭示不同创新模式在大科学装置科技成果产业化中的适用性, 并探索各模型之间的继承、发展与互动关系。研究表明, 不同类型大科学装置的科技成果产业化过程存在差异: 平台型装置能够依托三螺旋模型促成基础科学与技术应用的双向循环; 专用型装置更多呈现线性模式与发明-发现循环的嵌套, 公益型装置则主要依赖政府主导的开放式创新。参与产业化的多元主体在不同阶段可实现角色的动态转换。四种创新模式各有适用边界, 通过在不同语境下的融合与调配, 可以构建出更加适用于大科学装置科技成果产业化的动态创新分析框架。

关键词: 创新模式; 线性模式; 二维象限模型; 三螺旋模型; 发明-发现循环模型; 大科学装置; 科技成果产业化

中图分类号: G311;F124.3;T-01

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(XXXX)XX-0001-15

引言

1912年, 熊彼特(J. A. Schumpeter)界定了“创新”的概念, 并提出了五种创新类型^[1-2]。此后, 关于这些创新类型的研究逐渐深化, 并广泛地扩展到科技、社会学、管理学等多个领域。从开展创新活动的主体视角出发, 学术界对企业、高校、机构和国家等

主体的创新模式构建、比较、演变及提升路径等问题展开了日益深入的探讨。学者们努力探究不同主体如何形成独特的创新策略与模式, 并持续讨论这些策略与模式在实践中如何演化。自布什提出线性模式^[3]至20世纪80年代, 学界对于创新模式的研究表明, 创新是一个动态、集成、综合的过程, 应当从创新的全过程而非单一片段出发来审视创新活动^[4]。目前, 学

收稿日期: 2025-05-31; 修回日期: 2026-03-23

基金项目: 国家社科基金中国历史研究院重大历史问题研究专项: 近代以来的科技进步与社会变迁(22VLS017)

作者简介: 吴月佳(2000—), 女, 硕士, 研究方向为科学技术与社会。E-mail: wuyuejia22@mails.ucas.ac.cn

*柯遵科(1977—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为科学史和科学哲学。E-mail: kezunke@ucas.edu.cn(通讯作者)

引用格式: 吴月佳, 柯遵科. 创新模式与大科学装置的科技成果产业化[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250076.

WU Yuejia, KE Zunke. Innovation Models and Technological Industrialization of Large Scale Scientific Facilities[J]. Journal of Engineering Studies, DOI:10.3724/j.issn.1674-4969.20250076.

术界已经形成了四种较为成熟的创新分析模式：线性模式、二维象限模型、三螺旋模型以及发明-发现循环模型。

不同时期的创新模式不仅揭示了科技与经济之间的复杂关系，还为不同的发展模式与路径提供了指导。在大科学时代，大科学装置在科学研究方面扮演着战略角色^[5]，同时，其社会影响及经济效益也日益受到重视^[6-9]，能够为国防创新或产业创新活动提供有力支撑^[10]。大科学装置所依托的科技成果产业化，正是大科学时代科技与经济沟通、促进经济社会发展的关键体现，展现了在特定科学背景下独特的创新模式与路径，具有深远的现实意义。

我国已有学者对依托大科学装置进行科技成果产业化的问题进行了初步探索，就成果转化与产业化的模式^[11-14]、经验与关键因素^[15-16]、融合机制^[17]以及人才培养^[18]等方面形成了初步认识。然而，当前研究多采用经验性方法，集中于总结个别装置的产业化模式，虽然回答了“为什么”和“怎么样”的问题，但较少从理论层面探讨大科学装置开展产业化的“应然”问题。通过分析不同的创新模式及其相关理论，可以为明确大科学装置科技成果产业化的模式与路径提供思路，并为其实践奠定坚实的理论基础。鉴于此，本文将从理论模型出发，探讨创新的线性模式、二维象限模型、三螺旋模型以及发明-发现循环模型为大科学装置科技成果产业化提供的理论与政策指导。

1 线性模式与大科学装置的科技成果产业化

线性创新模式的经典理论阐述，集中体现于范内瓦·布什（Vannevar Bush）于1945年提交的《科学：无尽的前沿》报告^[3]。该报告的基本观点之一认为：科学是创新的起因与来源，基础研究是技术进步的先行者。基础科学有长远的根本性的意义，是技术创新的源泉。

布什在担任科学研究发展局（Office of Scientific Research and Development, OSRD）局长期间，推动“曼哈顿计划”的成功实施。通过实施这项计划，一批著名的国家实验室在美国创建，直接影响了美国大

科学装置的发展。在“曼哈顿计划”中，为了实现原子弹的研制，美国政府投入巨资建设了包括原子反应堆在内的重要科研设施，后来成为国家实验室的雏形，如洛斯阿拉莫斯国家实验室（Los Alamos National Laboratory, LANL）、橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Laboratory, ORNL）、阿贡国家实验室（Argonne National Laboratory, ANL）和桑迪亚国家实验室（Sandia National Laboratories, SNL）等。战后，在布什报告的推动下，基础研究在创新链中占据核心，以资助基础研究、倡导自由发展为核心理念的国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）成立。在布什报告的广泛影响力下，大科学装置和国家实验室曾一度成为基础研究的代名词。从历史视角审视，布什的线性模式之所以能取得成功，很大程度上得益于军事战争与国际竞争的推动。基础研究与国防军事需求的紧密捆绑，以及与大科学装置和国家实验室的密切联系，共同促成了这一模式的成功。

另一方面，线性模式是关于创新活动的最早理论框架，在布什观念的影响下，产生了由基础科学到技术创新，再转化为开发、生产和经济发展的模式。这种模式是一种代表动态形式的一维的“线性模式”，即基础研究引起应用研究与开发，再依据创新是一种产品还是工艺，转到生产或经营。科技创新应该按照“基础研究→应用研究→发展研究→生产和开发”的线性模式进行。基础研究与经济增长之间也存在“基础研究→新概念、新原理→新成品、新工艺→新产业→经济增长”的线性关系^[19]。

该模式表明，从长期收益的角度来看，学术界从事的基础研究，通过线性序列的推进，最终将对企业技术创新、产品创新、工艺创新以及服务业态创新等产生推动作用^[20]。在此模式下，科技成果产业化的过程也被视为单向线性的，但目前对这一过程中创新主体间的互动关系尚未给予充分的关注^[21]。大科学装置的初衷是实现科技进步、技术追赶与超越等科学技术效益，其定位是作为基础研究的支撑平台。在基础性、前沿性的科学研究中，大科学装置发挥着策源地的作用。然而，基础研究成果在科学技术通向产业化的过程中，存在难以逾越的鸿沟。这要求科研成果

不仅要实现产品化, 而且在产品化之前, 技术的不断创新与提升也是不可或缺的。因此, 依托大科学装置的科技成果产业化具有链条更长、前端研发占比大的特点, 而利用装置突破核心技术也是其不可或缺的一部分。从这一角度看, 依托大科学装置的科技成果产业化与线性模式相契合。以兰州重离子加速器 (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL) 为例, 其依托数十年基础研究积累, 摸清了碳离子束流杀伤肿瘤细胞的基本原理, 进而攻克了医用重离子加速器关键技术。经过临床试验验证后, 该技术于 2019 年获批三类医疗器械注册并实现产业化推广。同样, 中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 相关技术催生的首个产业化项目——硼中子俘获治疗 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) 项目也经历了类似的过程。这两个例子都展示出了新模式影响大科学装置科技成果产业化的两个特点: 首先, 从基础研究出发, 最终将新技术、新工艺或新产品等推向市场与产业, 二者创新环节的起始点与终点一致; 其次, 使用大科学装置开展的科学研究通常周期更长、投入更大, 成果产出这一环节通常面临较大的瓶颈, 故前端基础研究的成败具有决定性作用, 基础研究的地位如布什所宣称的一样举足轻重。

二战以后, 美国联邦政府给予科学研究的资助持续增长, 然而, 随着冷战威胁的减弱和美国社会民主运动的兴起, 联邦政府对科学研究的资助程度自 20 世纪 60 年代后期开始削弱^[21]。直到 20 世纪 80 年代后, 美国国家对科学研究的资助体系发生了彻底转型。20 世纪 80 年代初, 以 R.R. 威尔逊 (Robert R. Wilson) 为首的一批美国高能物理学家倡议建造超导超级对撞机 (Superconducting Super Collider, SSC)。从 1987 年 SSC 工程正式实施到 1993 年底美国国会最终决定中止 SSC 建设工程, 历时 7 年, 投资超 20 亿美元的大科学装置建设由于其背后政治博弈、科学与经济价值争议等原因戛然而止^[22]。这在某种程度上宣告了线性模式的破产, 政府对投资建设大型科学工程的态度发生了变化, 引发了社会各界对于大科学装置的经济效益、预期回报与产业化问题的争论。

2 二维象限模型与大科学装置的科技成果产业化

二维象限模型在对线性模式的讨论与争辩中被提出。美国普林斯顿大学的唐纳德·斯托克斯 (Donald E. Stokes) 于 1997 年出版《基础科学与技术创新: 巴斯德象限》^[23]。斯托克斯基于线性模式与拓展型模式, 承认知识的发现与应用间存在张力, 但反对将科学研究简单分为基础研究与应用研究的传统二分法。他依据研究动机提出了横轴为是否面向应用, 纵轴为是否追求基本理解的二维的坐标体系, 而将科学研究分为包括波尔象限 (纯粹基础研究)、巴斯德象限 (应用导向的基础研究)、爱迪生象限 (纯粹应用研究) 等在内的四象限。其中, 应用导向的基础研究备受关注, 斯托克斯通过引证巴斯德奠定的微生物学研究的案例, 指出科学与技术间存在动态关联, 科学知识的发现与应用可以并存于同一科研活动过程中^[24]。“巴斯德象限”指那些既寻求对科学问题的基本理解, 又对社会有直接应用价值的研究。科学探索存在基础研究与应用结合, 显然布什的二分法无法涵盖此类科学研究^{[25]347}。

二维象限模型引发了学术界与政策界的广泛讨论, 其强化了科学、政府与社会之间的联系, 为美国创新政策提供了新的理论支点^[26]。后续学者进一步拓展二维象限模型, 提出技术科学象限^{[25]348}、组织化基础研究^[27]等分类, 强化了应用与基础研究的融合逻辑。此外, 二维象限模型理论的应用突破了传统科研机构的属性界定。在巴斯德象限指导下, 科研活动与成果转化相互融合, 平台机构被赋予产业属性, 从而打破基础研究、应用研究和技术开发之间的界限, 促成深度合作。产业转化型科研机构与战略前沿型科研机构正是这一思想的延伸^[28]。国家实验室和大科学装置作为更具战略性、前沿性的科研平台, 既承担基础研究使命, 又以国家战略需求为导向, 兼具前瞻性与应用性。自 20 世纪上半叶美国国家实验室体系建立以来, 其始终聚焦国家战略任务^[29]。美国众多大科学装置由国家实验室运行管理。随着“人类基因组计划”“信息高速公路”等重大科技计划的推

进,美国部署了费米直线加速器 (Linac)、斯坦福直线对撞机 (Stanford Linear Collider, SLC) 等大科学装置^{[30]173},迅速在高能物理、能源、纳米科技等领域取得突破。依托大科学装置的国家实验室成为重大科学发现、先进技术与高端人才的重要载体,有力支撑了美国科技强国地位^{[30]174}。

我国的大科学装置定位与布局也蕴含着二维象限模型理论的特点。已建设运行的大科学装置可以分为专用型、公共平台型、公益型三类。其中专用型、公益型大科学装置是人类拓展认知能力、发现新规律、产生新技术的创新载体,与纯粹基础研究的波尔象限的吻合程度较高;公共平台型大科学装置更加强调用户需求与应用导向,使技术与科学的结合更加融洽,是巴斯德象限的影射。“十四五”规划提出的大科学装置建设名单中,将大科学装置重新划分为战略导向型、应用支撑型、前瞻引领型和民生改善型,同样涵盖了二维象限模型的思想。其中应用支撑型与民生改善型大科学装置都直接由具体的应用需求引发而建设,与巴斯德象限的思想更为契合,目的是为具体应用场景下提高科学研究与技术开发能力奠定基础、提供保障,进而突破技术封锁,实现产业创新或改善民生水平。CSNS是公共平台型大科学装置的代表,也隶属于应用支撑型大科学装置,其实践深刻诠释了巴斯德象限“应用导向的基础研究”理念。CSNS建立了专门的企业用户机制,利用大气中子辐照谱仪为华为、南方电网等数十家企业完成电子元器件检测,助力突破出口技术壁垒;借助中子衍射优势帮助比亚迪完成锂电池原位分析,支撑兆瓦级快充技术研发^[31]。这些研究在解决企业实际技术难题的同时推进了材料微观结构的科学认知,这正是巴斯德象限的典型特征。合肥同步辐射装置同样体现了这一逻辑,该装置衍生出的质谱成像技术可自动分辨组织性质,如癌旁组织与肿瘤组织,显著提高医疗诊断效率^[32]。研发团队在面向医疗应用的技术开发过程中,同步推进了对生物组织光学特性的基础认知。平台型装置的技术溢出具有多领域辐射特征,使其更易实现巴斯德象限所描述的基础与应用的双向渗透。

3 三螺旋模型与大科学装置的科技成果产业化

三螺旋理论蕴含了协同的思想,是学者们对科学研究主体关系的进一步反思。1990年之前国际学术界主要关注大学-产业、大学-政府及产业-政府双螺旋关系的研究,特别是大学-产业的研究^[33]。基于对麻省理工学院及周边高科技产业集群的观察,埃茨科瓦茨 (Henry Etzkowitz) 和雷德斯道夫 (Loet Leydesdorff) 提出大学-产业-政府三螺旋模型,用以分析知识经济时代三者的新型互动关系^[34-35]。该模型创建了非线性网状创新框架,三方以经济发展为纽带,通过产业联络、技术转移与合同办公室等媒介相互作用,螺旋上升^[36-40]。在这一动态关系中,各主体不仅保留传统身份,还可能因绩效需求而承担其他主体的角色^[41-43]。随着科研组织模式的演变,三螺旋中的“大学”被拓展为涵盖研究机构在内的“学术界”。何泉等^[44]在测度国家实验室协同创新时,将大学、科学院、政府研究机构、实验室、医院等统归为“科研机构”。国内学者亦将“政产学”三螺旋视为协同创新的典型范式,广泛应用于科技成果产业化与重大产业发展问题的分析^{[37]6}。

大科学装置深度嵌入进“政府-产业界-科研界”协同网络 (图1),其核心价值体现在两方面。其一,作为突破关键核心技术的利器,为科研人员提供普通实验室难以达标的极端实验条件,如综合极端条件实验装置具备极低温、超高压、强磁场等环境。其二,通过集聚培养高端科技人才形成内生创新力。大科学装置内部科学家,又称谱仪科学家,全程参与运维并指导外部实验,如合肥强磁场中心吸引哈佛博士后团队加盟^[45],CSNS的谱仪科学家全程参与装置运维并指导外部科研人员实验。在三螺旋模型框架内,大科学装置不仅作为独立的科研主体存在,还与外部科研界进行着双向的互动交流。图1以虚线圈绘出大科学装置位于科研界 (实线圈) 之内,象征其已成为科研界不可或缺的一部分,是科学技术成果产出的关键力量。然而,大科学装置并非孤立封闭,而是与外部科研界保持着“对话”,这种“对话”体现了其开放性

和包容性。大科学装置与科研界的双向箭头则代表二者紧密交流、合作的动态关系，大科学装置通过开放共享机制输送重大原创成果与人才，同时吸收外部研究需求驱动自身技术迭代。

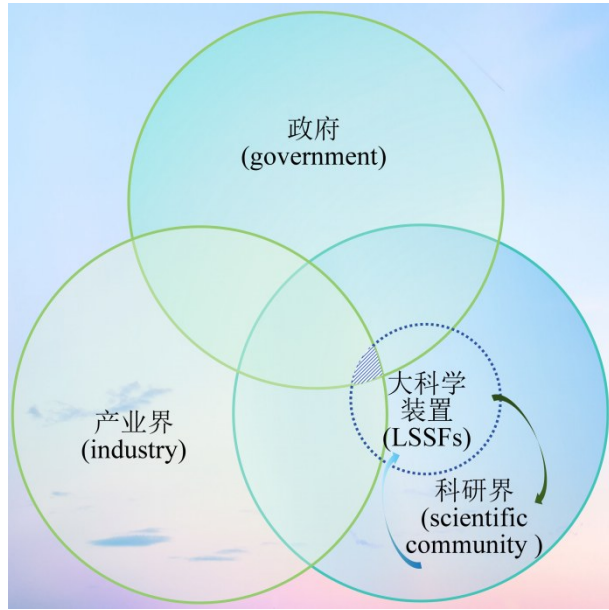


图1 嵌入大科学装置的政府-产业界-科研界三螺旋模型

Figure 1 The tripartite helix model of government, industry, and scientific community embedded within large-scale scientific facilities (LSSFs)

在依托大科学装置开展科技成果产业化的过程中，政府、大科学装置、产业界和科研界多方形成合力，促进大科学装置“沿途”成果、建成后产生的相关成果实现转化，提高产业创新能力，实现创新链与产业链的深度融合。CSNS的BNCT项目是三螺旋协同的典型案列，在东莞市政府多部门支持下，中国科学院高能物理研究所、国科中子医疗科技有限公司、东莞市人民医院形成“政府引导、科研支撑、产业协同、临床落地”的创新网络。2025年8月，国产首台BNCT系统成功完成首例复发鼻咽癌患者治疗^[46]。这一进程中，政府扮演制度供给者，CSNS输出核心技术，企业承接转化制造，医院负责临床验证，各司其职又相互渗透^[47]。诸多国内大科学装置通过共建产业创新中心、规划科学城等模式，形成政产学研协同网络^[48]。亦有大科学装置在组织管理制度方面积极与企业、政府配合，如包含英国散裂中子源（ISIS

Neutron and Muon Source, ISIS）、日本质子加速器（Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC）、美国劳伦斯伯克利国家实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）（斯坦福直线加速器和回旋加速器等）、上海光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF）、兰州重离子加速器（HIRFL）在内的国内外大科学装置管理方均成立产业化促进部门，为依托装置产出的科技成果提供产业化动力，调动其积极性^{[15]820}。这些正是依托大科学装置开展科技成果转化过程中政产学研（装置）三边网络与混生组织的具体表现。

不同类型的大科学装置具有不同的应用目的，与产业、政府的互动程度有所不同。公共平台型大科学装置为多学科领域的基础研究、应用基础研究和应用研究服务提供强大的技术支持能力，通常来说，是三类大科学装置中与产业界接触、关联最多的一类装置。部分公共平台型大科学装置通过开放专用机时、构建企业用户网络，推动技术转移转化。例如，ISIS与劳斯莱斯、联合利华等300余家企业建立合作，通过快速通道和完全保密的商业服务机制，为企业提供材料科学领域的定制化研发支持^[49]。日本SPRING-8光源（Super Photon ring-8 GeV）将10%~20%机时用于企业研发，催生出了由企业主导在光源投资建设产学研合作/产业专用线站的新模式，如丰田汽车独立出资的Toyota beamline^[50]。我国上海光源线站仅在试运行期间就为35余家领军企业提供定制化技术解决方案，并已服务40余家药物研发机构，支撑了多款创新药物的研发^[51]。国际经验表明，企业深度参与装置共建与专用线站运营，可形成技术秘密积累与产业化快速通道。

专用型大科学装置用于实现特定学科领域的重大科学技术目标，与产业界互动相对较少、外溢效应较弱^[52]，但部分装置在建设运行中已显现技术溢出。例如，江门中微子实验（Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO）的建设还催生了一批关键核心技术落地转化：深圳大地幕墙公司，为解决探测器建设中的精密安装难题，研发了模块化技术，此技术不仅应用于深圳湾文化广场等项目，还成功“出海”，在美国纽约得到应用。另一方面，北方夜视

科技研究院集团则成功研制出国际首创的20英寸微通道板型光电倍增管，这一技术不仅在医疗仪器、辐射测量等领域大放异彩，还构建了一个自主可控的产业化平台^[53]。在高效低碳燃气轮机试验装置方面，东方汽轮机、中国重燃等十余家自主燃气轮机研发单位已受益于其服务。2026年初，透平试验平台顺利通过国家级性能工艺测试，填补了国内高温、高负荷冷却透平试验装置的空白。未来该装置还将与燃气轮机厂商深化合作，共同推动成果转化公司的成立，以期将技术、产品推向市场^[54]。这表明，尽管专用型装置的产业外溢效应不如平台型装置那样直接和广泛，但通过装置建设过程中的技术攻关，依然能够带动相关企业实现技术跃升，并逐步向产业领域辐射其影响力。

公益型装置不以产业升级为直接目标，通常不与产业界进行直接互动，而是通过政府主导的公共部门开放式创新机制，在运行过程中间接地产生经济社会效益。政府作为创新平台的搭建者，打破了装置运行与社会需求之间的制度壁垒，并引入了多元主体的协同参与，共同创造价值。以FAST为例，贵州省政府通过顶层设计，将FAST纳入首批“中国科技旅游基地”^[55]，并以政策性银行贷款引导40亿RMB投入天文小镇建设^[56]，从而吸引社会资本开发科普研学项目。这一举措不仅促进了FAST在脉冲星等领域的科学突破，还带动了贵州平塘“科技旅游”的爆发式增长^[57]，形成了一条从科学发现到科普传播再到旅游消费的价值链。中国西南野生生物种质资源库则体现了另一种路径，昆明市盘龙区政府依托种质资源库科研能力，联合区农投公司、村集体和种业企业，建设种质保护繁育基地，将体细胞胚育种技术精准导入咖啡产业，促进云南咖啡向精品化转型^[58]。两种实践表明，公益型装置的经济效益源于政府主导的开放式创新，通过布局规划、搭建平台与政策引导，将装置的公共价值外溢与社会多元主体参与相结合。这种“科技+产业”的间接溢出模式，其成效与装置自身条件、区域资源禀赋及地方政策导向密切相关，具有较强不确定性。

4 发明-发现循环与大科学装置的科技成果产业化

2016年，哈佛大学肯尼迪政府学院教授那拉亚那穆提（Venkatesh Narayanamurti）与欧度茂苏（Toluwalogo Odumosu）在《发明与发现：反思无止境的前沿》中提出发明-发现循环模型（Discovery-Invention Cycle Model, DIC）^[59]，对科学创新、技术创新与产业创新进行了新理论概括。该模型反思了布什线性模式与巴斯德象限，认为发现与发明是一个双向跨越、循环往复的有机整体，而非简单的基础与应用二分关系。DIC模型强调，科学研究是发明与发现之间动态转换的过程，两者相互依存，在创造新知识和新应用方面具有同等重要性。通过分析信息通信与核磁共振领域的诺贝尔奖“获奖家族”，那拉亚那穆提揭示了发明与发现的动态循环特征：发明并不总是直接源自科学发现，也可能由已有发明催生；重要的科学发现同样可能源于技术创新。1956年诺贝尔奖即展示了研究同时影响发现与发明的可能性，这类根本性创新（radically innovative）的研究成果更具综合性^{[59]51-57}。DIC模型为理解科技创新的复杂性与模糊边界提供了更为综合、整体的视角。

基于对诺贝尔奖获奖案例的分析，那拉亚那穆提进一步指出，秉持广义研究概念的机构（如美国工业实验室）能够促使发现与发明间的切换。这类机构允许研究人员同时开展理论与实践研究，即在研制原型装置的同时探索其基本性质，为根本性创新提供沃土。此外，多学科专业知识与研究者间高水平的互动也是发明-发现循环的关键因素——科学家与工程师、理论家与实验家之间的持续深入交流能够提升知识在创新循环中的流动性。营造利于循环流动的环境同样重要，需建立跨主体协同机制以整合创新过程，同时树立长期视角，关注研究的深远影响。发明-发现循环模型强调长远的技术愿景与未来科学，这与我国部分大科学装置的建设目的密切吻合。《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012—2030年）》明确，大科学装置是为探索未知世界、发现自然规律、实现技术变革提供极限研究手段的复杂系统。我国已建成

的大多数装置可归类为以世界科技前沿为导向的前瞻引领型, 承担“从0到1”的探索型研究任务^{[60]426}, 其长周期特征与DIC模型高度契合。

在“发明-发现”循环模型框架内, 平台型与应用支撑型大科学装置的开放使用为根本性创新构筑了有利条件。这类装置不仅为探索性研究提供了必要的基础设施, 而且着重于推动创新研究的开展。2009—2024年, SSRF支持用户完成了超过2万个实验项目, 发表了1.1万余篇学术论文, 涵盖了从纯粹的基础研究——包括在《自然》和《科学》等顶级期刊上发表的超过220篇论文——到面向应用的技术创新, 如病毒疫苗结构设计、质子治疗系统的国产化, 这些都体现了研究同时促进发现与发明的潜力^[61]。更重要的是, 应用需求不断反馈至装置优化, 促进了线站建设和谱仪升级。这种“发现支撑发明、发明牵引发现”的循环机制, 正是DIC模型的典型体现。2026年1月, 东莞理工学院团队在CSNS工程材料中子衍射谱仪上开展电弧熔丝增材制造原位打印试验, 既破解了3D打印过程无法实时捕捉材料内部动态变化的行业难题, 又在试验中深化了对金属材料动态演化的科学认知, 实现了技术创新与科学发现在同一过程中的同步推进^[62]。DIC模型在科学、技术和工程间架起桥梁, 能够指引平台型装置的科技成果产业化。此类装置通常针对国民经济支柱产业和战略性新兴产业的瓶颈问题, 以技术突破和国家需求为导向, 致力于将基础研究成果转化为实际应用^{[60]426}。同时, 平台型装置具备科学研究与工程应用双重能力, 支撑跨领域跨学科合作。研究表明, 2009—2022年SSRF产出的科研论文, 跨学科融合水平逐步提高, 跨越4~6个学科的论文数量显著增加^[63]。这种特性与管理机制能够有效促进根本性创新萌芽, 推动发明性研究在知识流动中迭代升级, 支撑关键技术领域的工程实施与产业进步。

在DIC模型的国际影响层面, 美国部分大科学装置的运营管理正呈现出从“科学驱动”向“科学-技术双向贯通”的转型趋势。以美国能源部为例, 其下属国家实验室在化学工程、生物学、凝聚态物理、计算科学等30余个学科领域构建了核心研究能力, 并运营着阿贡领导力计算设施 (Argonne Leadership

Computing Facility, ALCF)、DIII-D国家聚变设施 (DIII-D National Fusion Facility) 等近30座世界知名的大科学装置, 研究活动覆盖从早期概念探索到成熟技术开发的完整创新链^[64]。从DIC模型的视角来看, 这种多学科集成、全链条贯通的布局, 为发现与发明之间的持续转换提供了制度与平台支撑。然而, 现有机制在向能源、临床等应用领域延伸时仍存在衔接短板。那拉亚那穆提因此强调, 能源部及其下属装置需进一步强化与产业界的深度协同, 卫生研究院则应加强与临床研究的联动, 从而真正将DIC模型所揭示的“发明-发现”动态循环嵌入大科学装置的管理实践之中。

5 四种创新模式的关系与融合应用

在科技政策领域, 从布什的线性模式到DIC模型, 一系列理论模型不断演进, 共同构成了理解科学与技术发展的坚实基础。布什的线性模式将基础研究视作创新的源泉, 并强调其与应用研究的分离。二维象限模型进一步发展了这一观点, 引入了巴斯德象限, 突出了应用驱动基础研究的重要性。三螺旋模型引入了协同思想, 强调政府、学术界与产业界之间的互动关系。DIC模型则对线性模式及巴斯德象限提出了批判, 提出了一个发明与发现双向循环的动态知识生产框架。这四种模型在研究分类上呈现出从二元对立到整体性回归的演进轨迹。从布什严格划分基础与应用研究, 到二维象限承认二者的融合但未打破界限, 再到三螺旋从行动主体视角跳出分类局限, 最终DIC回归研究活动本质, 搭建了一个灵活动态的知识生产模型。在研究实践上, 也出现了从专业性偏好向跨学科协作的转变。三螺旋与DIC尤其强调协同创新与跨学科合作的重要性, 认为解决复杂问题需要多领域专家的协作和机构的联动, 以及能够鼓励根本性创新的研究机构和复合型人才。

大科学装置的科技成果产业化并非单一创新模式的线性延伸, 而是多模型动态适配的复杂过程。大亚湾中微子实验的建设过程体现了三螺旋模型与发明-发现循环的融合。中国科学院高能物理研究所提出独到的探测器设计方案, 广东中泽重工承接核心部件钢

罐制造任务，为达到远超企业常规能力的焊接精度，科研机构与企业围绕核心技术攻关形成深度协同^[65]，体现了三螺旋中的主体互动。企业为攻克技术难关进行了近80次焊接试验，第一台钢罐耗时超过1 a，是普通产品的7倍^[66]，但在这一过程中实现了制造精度和工艺创新的根本性跃升，也成功实现了发明-发现循环所描述的技术能力跃升与知识积累的双向循环。BNCT项目在产业化进程中经历了三个关键阶段，不同的创新模式适配不同的发展阶段。其技术积累阶段集中体现了线性模式驱动的技术供给逻辑，技术突破高度依赖政府主导的科研计划投入与散裂中子源工程团队的持续攻关。在产业化初试阶段，BNCT研发进入巴斯德象限——基础研究（装置优化）与应用目标（癌症治疗）深度交织，技术成熟度显著提升。在产业化模式逐步确定的过程中，BNCT项目形成了三螺旋模型与发明-发现循环下的协同网络，政府、装置与产业间存在深度互动，科学探索与技术应用也能够相互反馈^[46]。

在考虑四种创新模式互补性的基础上，其产业化模式的形成受到装置类型、技术特性和制度环境的共同调节。对于平台型或应用支撑型装置，其技术溢出具有多领域辐射的特点，这促进了多模型协同，特别适合采用巴斯德象限与三螺旋协同的复合模式，这种模式尤其依赖于任务导向与市场需求的共同推动。而专用型装置则因其技术路径的高度聚焦，其产业化更多地依赖于线性模式与DIC模型的嵌套，在完成基础原理验证的同时，借助循环模型优化实际功能与应用。至于公益型装置，由于其技术成熟度低且商业化周期长，模型互补需侧重政府主导的长期投入逻辑，在确保科学目标的前提下，通过数据开放、技术溢出与社会需求对接，探索可持续的开放式创新机制。这种多样性表明，大科学装置产业化需突破静态理论框架，在四种创新模式的动态平衡中构建适应性策略。

6 优化路径与政策建议

我国大科学装置的布局思路已从“基础研究为主”转为“基础与应用并重”^[67]。通过应用不同创新模式探讨其科技成果产业化，可深入理解其运作过

程，为功能定位转向提供理论依据，并总结产业化经验。线性模式适用于早期技术攻关阶段；巴斯德象限在平台型、应用支撑型装置中体现最为典型，展示了应用导向的基础研究如何促进科学与技术的双向渗透；三螺旋模型在BNCT项目中得到验证，形成多方协同创新网络；发明-发现循环则贯穿装置运行全过程。BNCT案例表明，大科学装置的产业化需要多个创新模式的动态适配。“十五五”期间，装置建设更加聚焦国家战略与未来产业布局，应依据不同功能定位融合创新模式，以整体、系统和动态的视角指导产业化实践。

基于对不同创新模式的分析，大科学装置科技成果的产业化可以考虑三重路径。第一，构建分阶段支持体系。基础研究阶段以政府投入主导长周期高风险探索，应用阶段引入巴斯德象限理念，通过产业需求库与联合实验室衔接技术验证；产业化阶段依托地方园区提供税收减免、知识产权质押等政策闭环。第二，强化政产学研三螺旋协同。政府设立产业化办公室统筹对接，科研机构完善技术转移机制，产业界牵头组建技术联盟攻关共性瓶颈。第三，实施差异化路径。前瞻引领、战略导向型装置设立交叉实验室推动“原理-应用”双向循环；平台型或应用支撑型装置提高产业机时占比，引入企业投资优化市场化机制，公益型装置探索“科技+文旅”模式，以科普IP激活区域经济。

7 结论

大科学装置作为国家战略科技力量与新质生产力的重要载体，其科技成果产业化是打通创新链、产业链、资金链、人才链的关键环节，对推动我国科技高水平自立自强与产业高质量发展具有重要战略意义。当前我国大科学装置建设已从规模扩张转向效能提升，从“基础研究为主”转为“基础与应用并重”，如何依托经典创新理论破解成果转化难题、构建适配性路径，成为亟待回答的理论与现实问题。本研究围绕线性模式、二维象限模型、三螺旋模型与发明-发现循环模型四类经典创新理论，系统解析其在大科学装置科技成果产业化中的适用性与实践路径，主要结

论如下。

第一, 四种创新模式在大科学装置产业化中各有理论价值与适用边界。线性模式揭示了基础研究驱动技术突破与产业应用的单向传导逻辑, 适用于装置早期原理验证与核心技术攻关阶段; 二维象限模型以巴斯德象限为核心, 强调应用导向的基础研究, 契合平台型、应用支撑型装置的功能定位; 三螺旋模型构建政府-科研界-产业界协同网络, 为多元主体协同转化提供组织机制; 发明-发现循环模型揭示科学发现与技术发明双向互促、循环迭代规律, 适配装置长周期、跨学科的颠覆性创新特征。四种模式并非相互替代, 而是在创新演进中形成继承、互补与融合的理论体系。

第二, 不同类型大科学装置的产业化路径存在显著差异。平台型/应用支撑型装置技术溢出广、产业关联强, 适合采用巴斯德象限与三螺旋协同的复合模式, 以需求牵引与多方协同推动成果高效转化; 专用型装置学科目标聚焦、外溢效应相对间接, 多呈现线性模式与发明-发现循环嵌套特征, 依托建设与运行

中的技术攻关实现产业辐射; 公益型装置不以直接产业化为目标, 主要依靠政府主导的开放式创新, 通过科技文旅、公共技术服务等路径实现价值转化。

第三, 大科学装置产业化是多主体、多阶段、多模型动态适配的复杂过程。政府、科研机构、企业等主体在不同阶段可实现角色动态转换, 单一创新模型难以覆盖全流程。建议在实践中依据装置类型、技术成熟度与转化阶段, 对四种模式进行灵活调配与融合应用, 构建“基础研究-应用开发-产业落地”分阶段支持、政产学研多主体协同、不同装置差异化推进的动态创新分析框架, 提升成果转化效率与可持续性。

本研究丰富了大科学时代创新理论的应用场景, 为重大科技基础设施成果转化提供了理论支撑, 同时为我国大科学装置功能定位优化、产业化路径设计与创新政策制定提供可借鉴的实践依据, 有助于推动创新链与产业链深度融合, 加快培育新质生产力。未来研究可结合更多装置案例, 开展量化实证与国际比较, 进一步优化适配中国国情的大科学装置科技成果产业化机制与政策体系。

致谢

衷心感谢中国科学院大学经济与管理学院的张玲玲教授, 她在本文的研究过程中给予了宝贵的学术指导与专业支持; 同时也特别感谢中国散裂中子源为本研究提供了不可或缺的数据支持。

参考文献

- [1] 约瑟夫·熊彼特. 经济发展理论: 对于利润、资本、信贷、利息和经济周期的考察[M]. 何畏, 易家详, 译. 北京: 商务印书馆, 2020. Schumpeter J A. Theory of Economic Development[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1934.
- [2] 韩儒博. 创新模式研究及其国际比较[D]. 北京: 中共中央党校, 2013: 31. Han R B. Research on innovation patterns and international comparisons[D]. Beijing: Party School of the Central Committee of CPC, 2013: 31.
- [3] 范内瓦·布什, 拉什·D. 霍尔特. 科学: 无尽的前沿[M]. 崔传刚, 译. 北京: 中信出版集团, 2021. Bush V. Science, the Endless Frontier[M]. Washington: United States Government Printing Office, 1945.
- [4] 刘慧芬. 产学研合作模式和机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 9. Liu H F. Research on the patterns and mechanisms of industry-university cooperation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 9.
- [5] Qiao L L, Mu R P, Chen K H. Scientific effects of large research infrastructures in China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2016, 112: 102-112.
- [6] Castelnovo P, Florio M, Forte S, et al. The economic impact of technological procurement for large-scale research infrastructures: Evidence from the Large Hadron Collider at CERN[J]. Research Policy, 2018, 47(9): 1853-1867.
- [7] 王帅, 孙鑫琴, 赵蕊, 等. 组态视角下大科学装置产业溢出效应影响因素研究[J]. 中国科技论坛, 2024(2): 30-41.

- Wang S, Sun X Q, Zhao R, et al. Research on the influencing factors of industrial spillover effect of large-scale scientific facilities from the perspective of configuration[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2024(2): 30-41.
- [8] 梁永福, 盘思桃, 林雄, 等. 大科学装置集群的协同创新与产业带动效应: 以广东大科学中心为例[J]. *科技管理研究*, 2018, 38(3): 5-10.
- Liang Y F, Pan S T, Lin X, et al. Collaborative innovation and industry-driven effect of large-scale scientific facilities cluster: Taking Guangdong large-scale scientific facilities center as an example[J]. *Science and Technology Management Research*, 2018, 38(3): 5-10.
- [9] Nurakhov N N, Malyshev A S, Kolesnikova E A, et al. Socio-economic impact of the creation and operation of mega-science projects[J]. *International Journal of Criminology and Sociology*, 2022, 9: 563-571.
- [10] 王大洲. 中国大科学工程史[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2022.
- Wang D Z. History of China's Great Scientific Engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang Education Publishing House, 2022.
- [11] 尚智丛, 赵凯. 大科学装置成果转化模式探析: 以北京正负电子对撞机为例[J]. *科技进步与对策*, 2011, 28(19): 6-10.
- Shang Z C, Zhao K. Analysis on the transformation mode of scientific apparatus's achievements: A case study of BEPC[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2011, 28(19): 6-10.
- [12] 王玉华, 黄英良, 郭红燕. 公共实验平台型大科学装置成果转化路径探析: 以中国稳态强磁场实验装置和英国散裂中子源为例[J]. *科技促进发展*, 2021, 17(12): 2080-2087.
- Wang Y H, Huang Y L, Guo H Y. Analysis of the scientific and technological achievements transformation of the large-scale scientific facilities with the type of public experimental platform[J]. *Science & Technology for Development*, 2021, 17(12): 2080-2087.
- [13] 吴幸雷, 邬亚男, 周谦, 等. 大科学装置产业化集群发展模式与路径研究: 以广东为例[J]. *科技创业月刊*, 2023, 36(12): 28-32.
- Wu X L, Wu Y N, Zhou Q, et al. Research on the development model and path of industrialization clusters for large scientific devices: Taking Guangdong as an example[J]. *Journal of Entrepreneurship in Science & Technology*, 2023, 36(12): 28-32.
- [14] 李斌, 李思琪. 社会效益、区域平衡、政府扶持、地方特色: 重离子加速器成果产业化经验[J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2015, 7(4): 323-331.
- Li B, Li S Q. The industrialization experience of scientific results of HIRFL: Social benefits, regional balanced development, government support, local advantage[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2015, 7(4): 323-331.
- [15] 张玲玲, 白雪, 王蝶, 等. 依托大科学装置进行产业化的关键因素研究[J]. *科技促进发展*, 2018, 14(9): 817-825.
- Zhang L L, Bai X, Wang D, et al. Key factors for the industrial application of large-scale scientific facilities[J]. *Science & Technology for Development*, 2018, 14(9): 817-825.
- [16] 胡伟, 吴利芳, 蔡强. 公共实验平台类大科学装置的产业化融合机制研究[J]. *科技创新导报*, 2019, 16(12): 199-201, 203.
- Hu W, Wu L F, Cai Q. Research on the industrialization integration mechanism of public experimental platform similar to scientific apparatus[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(12): 199-201, 203.
- [17] 胡元蛟, 吴妍妍. 大科学装置产业化人才培养对策研究: 以美、德、英、日等发达国家为比较视角[J]. *中国高校科技*, 2020(7): 48-51.
- Hu Y J, Wu Y Y. Research on the Countermeasures of Industrialization Talents Training in scientific apparatus: From the comparative perspective of developed countries such as the United States, Germany, Britain and Japan[J]. *Chinese University Science & Technology*, 2020(7): 48-51.
- [18] 周程. 应该确立大学在我国基础研究中的主体地位[J]. *科学学研究*, 2011, 29(12): 1768-1770.
- Zhou C. We should establish the dominant position of universities in China's basic research[J]. *Studies in Science of Science*, 2011, 29(12): 1768-1770.
- [19] Godin B. The linear model of innovation: The historical construction of an analytical framework[J]. *Science, Technology, & Human Values*, 2006, 31(6): 639-667.
- [20] 郁培丽, 冷丽婧. 技术转移价值创造研究综述与展望[J]. *外国经济与管理*, 2024, 46(6): 67-82.
- Yu P L, Leng L J. A review and prospects of technology transfer value creation research[J]. *Foreign Economies & Management*, 2024, 46(6): 67-82.
- [21] 刘旭东, 王胜本. 美国联邦政府高等教育财政资助形态的历史发展与生态型完善[J]. *华东师范大学学报(教育科学版)*, 2015, 33(2): 110-116.
- Liu X D, Wang S B. Development and ecological improvement of higher education financial assistance in U.S. Federal government[J]. *Journal of East China Normal University (Educational Sciences)*, 2015, 33(2): 110-116.
- [22] 高原, 王大明. 美国超导超级对撞机案例研究[J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2011, 3(1): 41-49.

- Gao Y, Wang D M. Research on the superconducting super collider project in the United States[J]. Journal of Engineering Studies, 2011, 3 (1): 41-49.
- [23] D.E. 司托克斯. 基础科学与技术创新: 巴斯德象限[M]. 周春彦, 谷春立, 译. 北京: 科学出版社, 1999.
Stokes D E. Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation[M]. Washington, D.C.: The Brookings Institution, 1997.
- [24] 温珂, 苏宏宇, Scott Stern. 走进巴斯德象限: 中科院的论文发表与专利申请[J]. 中国软科学, 2016(11): 32-43.
Wen K, Su H Y, Stern S. China's Pasteur's quadrant: Scientific publication and patenting within the Chinese academy of sciences[J]. China Soft Science, 2016(11): 32-43.
- [25] 刘则渊, 陈悦. 新巴斯德象限: 高科技政策的新范式[J]. 管理学报, 2007, 4(3): 346-353.
Liu Z Y, Chen Y. New Pasteur's quadrant: New paradigm of high-tech policies[J]. Chinese Journal of Management, 2007, 4(3): 346-353.
- [26] 南岭. 追寻科技创新政策的底层逻辑, 从三本书读懂美国 70 多年科技创新之路[EB/OL]. (2023-04-07)[2025-03-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1762448118201778174>.
Nan L. Pursuing the underlying logic of science and technology innovation policies: Understanding the 70-year scientific and technological innovation path of the United States through three books[EB/OL]. (2023-04-07) [2025-03-27]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1762448118201778174>.
- [27] 王大洲. 工程创新视野下的应用基础研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(6): 477-487.
Wang D Z. On applied basic research from the perspective of engineering innovation[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(6): 477-487.
- [28] 曾志敏, 朱冰妍, 柴茂昌. 科研机构分类模型构建: 基于巴斯德象限模型的视角[J]. 科学管理研究, 2023, 41(4): 48-55.
Zeng Z M, Zhu B Y, Chai M C. Construction of scientific research institutions classification model: Based on the perspective of Pasteur quadrant model[J]. Scientific Management Research, 2023, 41(4): 48-55.
- [29] 欧小军. 从大国重器到科技巨头: 美国能源部国家实验室高水平科技的奥秘及启示[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(10): 1-7.
Ou X J. From major power to tech giant: Mystery and enlightenment of high-level technology of the U.S. Department of Energy's National Laboratory[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(10): 1-7.
- [30] 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.
Wang Y F, Bai Y X. Developing mega-science facility to lead the innovation globally[J]. Management World, 2020, 36(5): 172-188.
- [31] 龙跃梅. 中国散裂中子源: 为大湾区科技创新与产业发展"加速"[N/OL]. (2026-01-28)[2026-03-08]. 科技日报, https://www.stdaily.com/web/gdxw/2026-01/28/content_467309.html.
Long Y M. China spallation neutron source: Accelerating scientific innovation and industrial development in the Greater Bay Area[N/OL]. (2026-01-28) [2026-03-08]. Science and Technology Daily, https://www.stdaily.com/web/gdxw/2026-01/28/content_467309.html.
- [32] 王弘毅. 大科学装置"宝库"开门[N]. 安徽日报, 2024-11-06(001).
Wang H Y. The "Treasure House" of large-scale scientific facilities opens its doors[N]. Anhui Daily, 2024-11-06(001).
- [33] 周春彦. 大学-产业-政府三螺旋创新模式——亨利·埃茨科维兹《三螺旋》评介[J]. 自然辩证法研究, 2006 (4): 75-77+82.
Zhou C Y. University-industry-government triple helix model of innovation: Review and introduction of Henry Etzkowitz's *Triple Helix*[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2006, (4): 75-77+82.
- [34] Etzkowitz H. Technology transfer: The second academic revolution[J]. Technology Access Report, 1993, 6 (7): 7-9.
- [35] Etzkowitz H, Leydesdorff L. The Triple Helix—University-industry-government relations: A laboratory for knowledge based economic development[J]. EASST review, 1995, 14 (1): 14-19.
- [36] 许强, 杨艳. 公共科技创新平台运行机理研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2010, 31 (12): 56-61.
Xu Q, Yang Y. The study on the operation mechanism of public technological platforms[J]. Science of Science and Management of S&T, 2010, 31(12): 56-61.
- [37] 张秀萍, 黄晓颖. 三螺旋理论: 传统"产学研"理论的创新范式[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2013, 34 (4): 1-6.
Zhang X P, Huang X Y. Triple helix theory: Innovation paradigm of traditional theory of industry-university-research[J]. Journal of Dalian University of Technology (Social Sciences Edition), 2013, 34(4): 1-6.
- [38] Leydesdorff L, Etzkowitz H. The triple helix as a model for innovation studies[J]. Science and Public Policy, 1998, 25: 195-203.
- [39] 叶鹰, 鲁特·莱兹多夫, 武夷山. 三螺旋模型及其量化分析方法研讨[J]. 中国软科学, 2014 (11): 131-139.
Ye Y, Leydesdorff L, Wu Y S. A discussed study on the triple helix with its quantitative analysis method[J]. China Soft Science, 2014, (11):

- 131-139.
- [40] 董铠军, 吴金希. 创新理论发展的四阶段论: 回顾与解读[J]. 自然辩证法研究, 2018, 34 (2): 60-65.
Dong K J, Wu J X. The four-stage opinion about the development of innovation theories: Review and interpretation[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2018, 34(2): 60-65.
- [41] Etzkowitz H. Innovation in innovation: The triple helix of university-industry-government relations[J]. Social Science information, 2003, 42 (3): 293-337.
- [42] Ranga M, Etzkowitz H. Triple Helix systems: An analytical framework for innovation policy and practice in the Knowledge Society[J]. Entrepreneurship and knowledge exchange, 2015: 117-158.
- [43] Amaral M, Cai Y. The tribology of the helixes: Relations between Triple, Quadruple and Quintuple Helix models[J]. Triple Helix, 2022, 9 (1): 1-5.
- [44] 何泉, 郭丽娜, 周群. 基于三螺旋模型的国家实验室协同创新测度及启示[J]. 中国科技论坛, 2020 (7): 52-59.
He X, Guo L N, Zhou Q. Measurement of collaborative innovation in national laboratories based on the triple helix model and its implications[J]. Forum on Science and Technology in China, 2020, (7): 52-59.
- [45] 沈湫莎. 决定大科学装置影响力的仍然是人[N]. 文汇报, 2018-10-23(002).
Shen Q S. The human factor still determines the influence of large scientific facilities[N]. Wenhui Daily, 2018-10-23(002).
- [46] 健康东莞. 重磅突破! 首台国产 BNCT 设备成功完成临床首例患者全流程治疗[EB/OL]. (2025-08-15)[2026-03-08]. <https://www.nfnews.com/content/ky9vWPr53G.html>.
Health Dongguan. Major breakthrough! First domestic BNCT device successfully completes first full-process clinical treatment[EB/OL]. (2025-08-15)[2026-03-08]. <https://www.nfnews.com/content/ky9vWPr53G.html>.
- [47] 吴月佳. 大科学装置科技成果产业化的模式与影响因素研究——以散裂中子源硼中子俘获治疗(BNCT)项目为例[D]. 北京: 中国科学院大学. 2025: 53-59.
Wu Y J. Research on the model and influencing factors of technological industrialization in large scale scientific facilities: Taking the BNCT project as an example[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 2025: 53-59.
- [48] 刘玉勉. 大科学装置“沿途”成果转化机制研究[J]. 发展研究, 2024, 41 (7): 56-63.
Liu Y M. Research on the mechanism for transforming "Along-the-Way" achievements of large scientific facilities[J]. Development Research, 2024, 41(7): 56-63.
- [49] ISIS Neutron and Muon Source. ISIS for business[EB/OL]. [2026-03-07]. <https://www.isis.stfc.ac.uk/using-isis/business/>.
- [50] 刘子洋, 黄孚. 日本重大科技基础设施服务产业发展演化探究[J]. 科学学研究, 2024, 42 (11): 2305-2317.
Liu Z Y, Huang F. Study on the evolutionary path of Japanese Large Scale Scientific facilities service industrial development[J]. Studies in Science of Science, 2024, 42(11): 2305-2317.
- [51] 方卓然. 2万+课题在这里实验, 上海光源“照亮”微观世界|高质量发展调研行[EB/OL]. (2024-05-27)[2026-03-15]. <https://www.163.com/dy/article/J37RRMCO0534A4SC.html>.
Fang Z R. Over 20,000 research projects conducted here: Shanghai synchrotron radiation facility (SSRF) "illuminates" the microscopic world | Tour on high-quality development [EB/OL]. (2024-05-27) [2026-03-15]. <https://www.163.com/dy/article/J37RRMCO0534A4SC.html>.
- [52] 薄力之. 国内外大科学装置集聚区[J]. 国际城市规划, 2023, 38 (2): 153-158.
Bo L Z. Domestic and foreign Large Scientific Facilities Clusters[J]. International Urban Planning, 2023, 38(2): 153-158.
- [53] 钟哲. 江门中微子实验 让参建企业“取回真经”[N/OL]. (2026-01-25)[2026-03-18]. 南方日报, https://epaper.nfnews.com/nfdaily/html/202601/25/content_10161383.html.
Zhong Z. Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) helps participating enterprises gain valuable experience and technologies [N/OL]. (2026-01-25)[2026-03-18]. DailyNanfang, https://epaper.nfnews.com/nfdaily/html/202601/25/content_10161383.html.
- [54] 连云港经济技术开发区科学技术局. 高效低碳燃气轮机试验装置首次对外完成纯氢燃烧室全温全压试验[EB/OL]. (2025-10-27)[2026-03-18]. <http://www.lida.gov.cn/lygjjskfq/bmdt/content/df5c6ba5-14d9-4e88-b137-370889f8e6a4.html>.
Bureau of Science and Technology, Lianyungang Economic and Technological Development Zone. High-efficiency and low-carbon gas turbine test facility completes first external full-temperature and full-pressure test of pure hydrogen combustor[EB/OL]. (2025-10-27)[2026-03-18]. <http://www.lida.gov.cn/lygjjskfq/bmdt/content/df5c6ba5-14d9-4e88-b137-370889f8e6a4.html>.

- [55] 李国辉. 借助"天眼" 贵州打造全域旅游新样本[N/OL]. (2017-11-13)[2024-11-06]. 羊城晚报, <http://travel.people.com.cn/n1/2017/1113/c41570-29643619.html>.
Li G H. Guizhou builds a new model of all-for-one tourism with help of FAST "China's Eye of Heaven" [N/OL]. (2017-11-13) [2024-11-06]. Yangcheng Evening News, <http://travel.people.com.cn/n1/2017/1113/c41570-29643619.html>.
- [56] 侯潇怡. 特色天文小镇运营样本: 金融资源天然不足"中国天眼"喜与痛[EB/OL]. (2018-03-19)[2026-03-18]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2018-03-19/doc-ifyskvif9394906.shtml>.
Hou X Y. An operational model of a characteristic astronomical town: Opportunities and challenges of China's FAST (eye of heaven) under inherent shortage of financial resources[EB/OL]. (2018-03-19) [2026-03-18]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2018-03-19/doc-ifyskvif9394906.shtml>.
- [57] 倪思洁. 多个大科学装置传来好消息[N]. 中国科学报, 2025-03-07(001).
Ni S J. Good news from multiple large-scale scientific facilities[N]. China Science News, 2025-03-07(001).
- [58] 中国网. 科技赋能高原农业:从实验室到田间的种源振兴之路[EB/OL]. (2025-10-15)[2026-03-18]. http://guoqing.china.com.cn/2025-10/15/content_118124511.shtml.
China.org.cn. Technology empowers plateau agriculture: A path to revitalizing germplasm resources from laboratory to fields[EB/OL]. (2025-10-15)[2026-03-18]. http://guoqing.china.com.cn/2025-10/15/content_118124511.shtml.
- [59] 文卡特希·那拉亚那穆提, 图鲁瓦洛戈·欧度茂苏. 发明与发现: 反思无止境的前沿[M]. 黄萃, 苏竣, 译. 北京: 清华大学出版社, 2018.
Narayanamurti V, Odumosu T. Cycles of Invention and Discovery: Rethinking the Endless Frontier[M]. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2016.
- [60] 黄从利, 周非特, 徐祥, 等. 加强应用支撑型重大科技基础设施建设, 增强我国高质量发展的科技基础能力[J]. 中国科学院院刊, 2024 (3): 423-435.
Huang C L, Zhou F T, Xu X, et al. Strengthen establishment of application-supported major science and technology infrastructure to enhance basic capacity of science and technology for high-quality development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(3): 423-435.
- [61] 许琦敏. 15年, 2万多项课题! 成果产出国内最多, 上海光源收获了什么[EB/OL]. (2024-05-06)[2024-11-20]. <https://new.qq.com/rain/a/20240506A09EV300>.
Xu Q M. 15 years, over 20,000 projects! What has Shanghai synchrotron radiation facility harvested as the most productive large scientific facility in China[EB/OL]. (2024-05-06)[2024-11-20]. <https://new.qq.com/rain/a/20240506A09EV300>.
- [62] 中国新闻网. 东莞理工学院携手散裂中子源完成原位打印试验[EB/OL]. [2026-01-16]. <https://www.chinanews.com/gn/2026/01-16/10553124.shtml>.
China News Service. Dongguan University of Technology collaborates with China spallation neutron source to complete *in-situ* printing experiment [EB/OL]. [2026-01-16]. <https://www.chinanews.com/gn/2026/01-16/10553124.shtml>.
- [63] Xing Y, Wu Y J, Wang D J, et al. Mega Research Infrastructure as a Driver for high-quality development and innovation: Promoting scientific cooperation and interdisciplinarity[J]. Project Leadership and Society, 2024: 100150.
- [64] 国际技术经济研究所. 美国国家实验室大科学装置对外合作机制与模式分析[EB/OL]. (2023-11-28)[2025-04-08]. <https://new.qq.com/rain/a/20231128A07ZOA00>.
Institute of International Technology and Economy. Analysis of Mechanisms and Models for International Collaboration of U.S. National Laboratories' Large Scientific Facilities[EB/OL]. (2023-11-28)[2025-04-08]. <https://new.qq.com/rain/a/20231128A07ZOA00>.
- [65] 吴月辉. 大亚湾中微子实验团队花费不到1.7亿元创造世界级科研成果[N]. 人民日报, 2013-02-08(016).
Wu Y H. Daya Bay neutrino experiment team achieves world-class scientific results with less than 170 million Yuan [N]. People's Daily, 2013-02-08(016).
- [66] 易运文, 齐芳, 杜艳. "抠"出来的世界奇迹——记大亚湾中微子实验取得重大物理成果的背后[N]. 光明日报, 2013-02-06(006).
Yi Y W, Qi F, Du Y. A world miracle made by "strict cost control": Behind the major physics achievements of the Daya Bay neutrino experiment [N]. Guangming Daily, 2013-02-06(006).
- [67] 倪思洁, 冯丽妃. "十五五"期间, 重大科技基础设施迎来新局面[N]. 中国科学报, 2026-03-06(004).
Ni S J, Feng L F. Major science and technology infrastructure usher in a new chapter during the 15th five-year plan period[N]. China Science Daily, 2026-03-06(004).

Innovation Models and Technological Industrialization of Large Scale Scientific Facilities

WU Yuejia, KE Zunke*

School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Highlights

Analyzes applicability of four innovation models in LSSFs' technological industrialization.

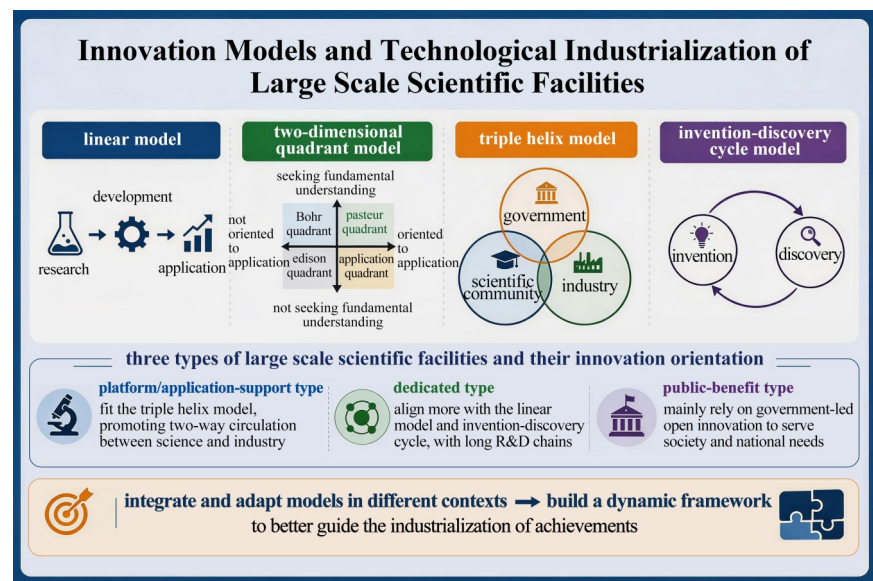
Highlights distinct industrialization processes of platform-type, special-purpose, and public welfare LSSFs.

Reveals dynamic role transformation of multiple subjects in Triple Helix Model during innovation stages.

Emphasizes bidirectional penetration between basic science and technical applications in platform-type LSSFs.

Proposes a composite analytical framework via interaction among the four innovation models for LSSFs.

Graphical Abstract



Abstract: Linear Model, Two-Dimensional Quadrant Model, Triple Helix Model, and Cycles of Innovation and Discovery (DIC) are four fundamental types of innovation models. The technological industrialization of Large Scale Scientific Facilities (LSSFs) is a crucial pathway for driving scientific and technological innovation as well as industrial upgrading, serving as a vital source of new quality productive forces. This study aims to explore the applicability of four classical innovation models in the technological industrialization of LSSFs. By analyzing the interaction among these models, this research seeks to provide a theoretical framework for the functional positioning and industrialization pathways of LSSFs, promoting deep integration of scientific innovation and industrial upgrading.

Through a combination of theoretical analysis and case studies, this research synthesizes the core theories of the four innovation models: the linear logic from basic research to industrialization, the application-oriented basic research embodied in Pasteur's Quadrant, the government-industry-academia collaboration mechanism in the Triple Helix Model, and the bidirectional interaction between science and technology in the DIC Model. Using Chinese LSSFs such as the China Spallation Neutron Source, Shanghai Synchrotron Radiation Facility, and the Daya Bay Neutrino Experiment Station as cases, the study examines how these models apply to different types of facilities.

Technological industrialization of LSSFs requires breaking through single-model frameworks to construct a "dynamic adaptation" analytical framework. First, establish a phased support system: government investment leads in the basic research stage, industrial demand databases are introduced in the application stage, and industrial park policies form a closed loop in the industrialization stage. Second, strengthen the trinity collaboration: the government sets up an industrialization office, research institutions optimize the technology transfer mechanism, and the industrial sector takes the lead in establishing technology alliances. Finally, design differentiated paths: platform-type facilities increase industrial machine time usage, specialized facilities focus on the "basic principle-application optimization" cycle, and public welfare facilities explore the IP economy of science popularization. These findings above provide theoretical references for industrialization policy-making and cross-stakeholder collaboration in LSSFs, emphasizing dynamic complementarity among models and adaptability to LSSF types, with practical

implications for enhancing new quality productive forces.

Technological industrialization of LSSFs requires breaking through single-model frameworks to construct a dynamic innovation analysis framework. This involves integrating and adapting the four innovation models according to different contexts: establishing a phased support system across basic research, application, and industrialization stages; strengthening trinity collaboration among government, research institutions, and industry; and designing differentiated paths for platform-type, special-purpose, and public welfare facilities. These findings provide theoretical references for policy-making and cross-stakeholder collaboration, emphasizing dynamic complementarity among models and adaptability to different facility types.

Keywords: innovation model; Linear Model; Two-Dimensional Quadrant Model; Triple Helix Model; Cycles of Innovation and Discovery; Large Scale Scientific Facilities (LSSFs); technological industrialization