

科研范式变革下大科学装置驱动科技经济高质量发展研究

林清华

中国科学院福建物质结构研究所 福建福州 350002

摘要：当前全球科研范式变革正推动科学研究向“四极”前沿（极宏观、极微观、极端条件、极综合交叉）和数据密集型、开放协同方向发展，这一变革催生了大科学装置从传统科研工具向国家战略基础设施的转型。本文以合肥同步辐射光源（HLS）与中国散裂中子源（CSNS）为案例，通过构建“创新基础设施乘数模型（IIMM）”，阐释了大科学装置通过“投资拉动—知识生产—创新溢出—产业转化”四阶段驱动区域经济发展的机制。研究表明，大科学装置的经济社会效益呈现显著的滞后性、长期性、累积性与递增性特征。

关键词：科研范式变革；四极前沿；大科学装置；耦合机制；创新生态

一、变革驱动的战略崛起

全球科研正经历深层次的范式转移，这一变革的核心，是探索疆域与组织逻辑的双重跃迁：科学探索正系统性地向“极宏观、极微观、极端条件与极综合交叉”这四大前沿推进；与此同时，数据密集型研究、全球开放协同与深度的学科融合，正重新定义科研活动的基本组织方式^[1, 12]。这一深刻的系统性变革，使得传统上依赖中小型科研团队和通用设备的“小科学”模式，在面对诸如物质科学、生命起源、清洁能源等复杂重大问题时，显得力不从心，加速催生了能够提供极限研究手段、产出海量科学数据、并作为国际化协作平台的大型科研基础设施——即大科学装置的战略崛起^[13]。它的角色已从服务于特定前沿的“高端仪器”，质变为支撑国家创新体系、驱动经济社会高质量发展的“战略基石”。因此，深入解析科研范式变革下大科学装置如何与区域经济系统发生耦合、实现价值倍增，不仅关乎对创新驱动本质的理解，更对优化国家科技战略布局具有紧迫的现实意义。

二、范式演进与大科学装置功能的重塑

当代科研范式的双重变革，并非孤立的技术进步，而是一场系统性重构，从根本上重塑了大科学装置的建设逻辑与价值内核。

一方面，向“四极”前沿的进军，构成了装置建设的根本物理需求。“极宏观”探索依赖“中国天眼”等巨型观测设施捕捉宇宙诞生之初的讯息；“极微观”解析需要借助大型对撞机与散裂中子源窥探物质的基本结构；“极端条件”研究离不开深海探测器和聚变实验装置模拟自然界的极限环境；而“极综合交叉”创新，则要求有能同时支撑人工智能、生物技术等多路径实验的融合性平台^[1, 13]。这些探索的每一步实质性突破，都直接取决于大科学装置所能提供的、常规实验室无法企及的“极限观测与实验能力”。另一方面，科研组织模式的三大趋势——数据成为核心资产、开放共享成为制度基石、学科壁垒被系统性打破——重新定义了装置的运行范式与社会功能^[2, 5, 12]。这使得大科学装置从产生离散数据的“实验终端”，转型为持续产出高质量数据流的“源头工厂”和公共知识仓库；从相对封闭的国家项目，转变为吸引全球智力合作的国际枢纽；从服务单一学科的专用工具，演进为汇聚多学科智慧的“交叉创新熔炉”。

为响应这一系统性变革，大科学装置自身也经历了深刻的战略性功能跃迁。其发展轨迹可概括为“三级跳”：从目标单一的“专用研究工具”，到服务多学科的“开放共享平台”，最终演变为集聚人才、技术、资本与企业的“战略创新基础设施”和“区域创新生态核心枢纽”^[13]。这一角色的根本性转变，必然要求其价值评估体系同步革新：成功标准应从聚焦高水平论文数量，转向系统地评估其知识溢出的广度与网络效应、关键技术向产业转化的效率与规模、对新兴产业集群的催化与

基金项目：福建省科技计划创新战略研究项目“科研范式变革背景下大科学装置驱动科技经济高质量发展的耦合关系研究”（2024R0104）。

作者简介：林清华（1990—），男，硕士，工程师，研究方向为科技创新管理。

赋能能力，以及对区域经济结构优化与长期竞争力的战略性贡献^[3, 7, 11]。

三、经济驱动机制的实证对比与模型建立

为阐释大科学装置驱动经济发展的内在机理与长期规律，本文选取合肥同步辐射光源与中国散裂中子源进行对比分析。二者分别代表了我国在不同代际大科学装置建设上的成功实践，其完整或阶段性的发展周期，为我们提供了观察“投资—知识—产业—生态”全链条耦合的珍贵样本。

合肥同步辐射光源（HLS）：作为我国第一代专用同步辐射装置，其超过三十年的历程堪称一部大科学装置发展的“活历史”，完整展现了长周期价值释放全过程。在建设要素奠基期（约前十年），HLS的核心价值在于对当时国内薄弱的高技术产业链进行了“强制性”拉动，并在攻坚克难中培养了我国第一批同步辐射工程与科研人才，为后续更复杂装置的建设储备了至关重要的“种子”团队^[3]。进入知识产出与能力沉淀期（第二个十年），装置通过稳定运行和持续升级，不仅支撑了在量子材料等前沿领域取得一批国际认可的成果，更通过其开创性的全国“用户培养”开放模式，为我国多个基础学科领域培育了数以千计的研究骨干，形成了一个以合肥为重要节点的全国性学术网络^[2, 3]。到了技术扩散与生态塑造期（近十余年），HLS的价值实现了更深层次的融合：其衍生的尖端分析技术直接服务于长三角的新材料与新能源产业研发；更重要的是，HLS与中国科学技术大学、中科院合肥物质科学研究院深度融合形成的“共生体”，构成了合肥综合性国家科学中心最原始、最核心的创新极核。这一“大装置—国家实验室—顶尖大学”紧密耦合的“合肥模式”，为后续成功集聚全超导托卡马克、稳态强磁场等更多大科学装置，并最终形成具有国际影响力的装置集群，提供了可复制的组织范式与创新文化基因，其战略价值远超任何直接的经济计量^[4]。

相较于HLS的长周期演进，中国散裂中子源（CSNS）则生动展示了新时期大科学装置对区域发展的“即时性”结构重塑与“强赋能”效应。CSNS的落户，如同一枚嵌入东莞市传统制造业体系的“创新芯片”，快速驱动了城市功能从“世界工厂”向“科技创新+先进制造”的战略跃升。数据显示，其运行以来，当地“科学研究和技术服务业”增速与占比显著提升，标志着创新要素在经济结构中权重的实质性变化^[6]。作为性能独特的国家“研发工具箱”，CSNS的核心优势在于其能像

“超级CT”一样，无损、精准地透视材料内部的微观结构与应力。这一能力迅速转化为产业竞争力：在新能源汽车赛道，其中子衍射技术为宁德时代、比亚迪等龙头企业优化电池性能提供了关键数据^[7, 9]；在航空航天领域，其残余应力测绘服务为中国航发攻克发动机可靠性难题提供了科学依据^[8]。同时，CSNS作为粤港澳大湾区的核心公共研发平台，其用户近半来自区内且企业用户比例持续增长，这表明它正深度嵌入区域产业链，高效促进着从基础研究到产业应用的快速循环，强化了大湾区的内部创新协同^[5, 11]。

基于上述跨越不同代际与区域的共性规律，本文提炼并构建了“创新基础设施乘数模型（IIMM）”，旨在以量化框架系统解析其动态驱动机制。模型将总经济贡献表述为四个核心分量的函数：

$$\Delta GDP(t) = DE(t) + IE(t) + TE(t) + \rho \cdot RE(t)$$

该模型揭示了四个前后相继、彼此叠加且存在正反馈的演进阶段：

第一阶段——投资拉动与要素原始集聚期（约0-8年）：以 $DE(t) = I_0 \cdot \alpha \cdot e^{-\delta t}$ 刻画直接建设投资的拉动效应（乘数 $\alpha \approx 1.5-2.0$ ）及高端要素的初始“磁吸”^[4, 11]。

第二阶段——知识资本密集生产与溢出期（约9-20年）：由扩展知识生产函数 $\frac{dK}{dt} = A \cdot [L_{R\&D}]^\eta \cdot [S(t)]^\phi \cdot K^\omega$ 描述，其中装置服务流量 $S(t)$ 的弹性 $\phi > 0$ 是关键。产出通过学术网络溢出，效应 $IE(t) \propto \beta \cdot K(t) \cdot H(t)$ ，系数 $\beta (\approx 0.3-0.5)$ 衡量扩散效率^[2, 3, 10]。

第三阶段——技术转化与产业激活期（约15-30年）：价值实现为 $TE(t) = \lambda \cdot [\gamma \cdot K(t-1) + \theta \cdot TC(t)]$ ，核心参数产业转化率 $\lambda (\approx 0.1-0.3)$ 高度依赖区域的金融生态、中介服务与企业吸收能力^[7, 8, 9]。

第四阶段——生态成熟与网络协同跃升期（25年以上）：网络协同效应 $RE(t)$ 由协同系数 $\rho (\approx 0.5-0.8)$ 综合表征，它决定了前期所有累积价值能被创新生态系统放大和倍增的最终幅度^[4, 5, 11]。

该模型深刻揭示了大科学装置经济效益的时间滞后性、阶段递进性与边际报酬递增性。其价值释放非一蹴而就，而是依次传导、逐步放大。最终，系统将形成“装置能力提升→吸引多元创新资源→产出丰富成果→反哺生态繁荣→进一步增强吸引力”的自我强化良性循环。

四、结论与展望

本研究通过长周期实证分析与理论建模，系统阐释

了科研范式变革、大科学装置兴起与区域高质量发展三者之间深刻的耦合机制。核心结论表明：当代科研范式的系统性转型，是大科学装置从“工具”向“枢纽”进行战略性跃迁的根本驱动力；其对经济的驱动是一个遵循明确阶段规律的长期价值释放过程，需要战略耐心，但其跨越临界点后的综合回报（经济、产业、人才、生态）极具杠杆效应。

IIMM模型的核心政策启示在于：评估和规划大科学装置，必须建立全生命周期的动态视角。其最终影响力不仅取决于立项时的科学目标，更取决于其与区域创新生态系统的融合深度、协同效率与共生关系。一个成功的大科学装置，其终极形态是转型为滋养区域创新“雨林”的基础性环境要素——即阳光、水源与沃土，而不仅仅是林中最高的一棵树。

面向以“AI for Science”为标志的新科研范式，下一代大科学装置必须具备更强的智能化、平台化与开放性，其规划必须从源头就与区域发展深度嵌套。这要求我们在进行超前硬件布局的同时，必须并行推动科技管理体制的深刻变革，着力破解制约知识溢出和成果转化的体制机制瓶颈，从而真正释放其作为国家战略科技力量核心引擎的巨大潜能，为赢得未来竞争优势奠定坚实基础。

参考文献

[1] 新华社. 全球科研向“四极”前沿发展[EB/OL].

中国科学院, 2024.

[2] 中国科学技术大学国家同步辐射实验室. 国家同步辐射实验室发展报告(2021)[R].2022.

[3] 中国科学院合肥物质科学研究院. 合肥大科学装置集中区建设与影响评估报告[R].2023.

[4] 安徽省统计局. 安徽省统计年鉴(1995—2023)[M]. 中国统计出版社.

[5] 中国科学院高能物理研究所. 中国散裂中子源2023年度用户报告[R].2024.

[6] 东莞市统计局. 东莞市统计年鉴(2012—2023)[M]. 中国统计出版社.

[7] 中国科学院高能物理研究所. 中国散裂中子源工程成果报告[R].2023.

[8] 中国航空发动机集团. 航空发动机关键部件残余应力检测与寿命评估技术报告[R].2022.

[9] 宁德时代新能源科技股份有限公司. 年度研发报告(2020—2023)[R].

[10] 国家知识产权局. 基于专利引用的技术扩散网络分析报告(2023)[R].2024.

[11] 东莞松山湖高新区管委会. 松山湖科学城人才与创新发展报告(2023)[R].2024.

[12] Freeman C. Technology, Policy, and Economic Performance[M]. Pinter Publishers, 1987.

[13] 李国杰. 大科学装置：从科学工具到创新引擎[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(5): 601—610.