

大科学工程创新体系建构研究

刘樑¹, 张雨涵¹, 李梦悦¹, 蒋攀¹, 曾静¹, 范国滨^{2*}

(1. 西南科技大学经济管理学院, 四川绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院, 四川绵阳 621022)

摘要: 大科学工程是国家科技创新的重要研发平台, 研究工程运行和科技研发全过程创新要素及其创新体系建构, 对充分发挥大科学工程的科学效益具有重要作用。本文在分析大科学工程创新体系建构需求的基础上, 梳理提炼了国内外不同领域大科学工程创新活动中的创新要素, 构建出大科学工程创新体系; 选取我国神光-III工程开展实证研究, 为我国各领域大科学工程的创新体系建构提供了一般范式。研究认为, 大科学工程创新体系是在创新环境的推动下, 创新主体、创新环节和创新资源要素协同开展创新活动并实现创新目标的动态系统; 大科学工程创新体系注重四大创新要素的横向协调及创新主体和资源的纵向协同。研究建议, 大科学工程创新体系的管理实践需重视核心创新主体的主导作用、创新参与主体的跨界融合、创新资源的有效配置以及创新环境的动态变化, 以此形成创新要素有效协同、创新活动高效开展的互动创新体系。

关键词: 大科学工程; 创新体系; 创新要素; 协同创新; 创新成就

中图分类号: G311 **文献标识码:** A

Construction of Innovation System for Major Science Projects

Liu Liang¹, Zhang Yuhan¹, Li Mengyue¹, Jiang Pan¹, Zeng Jing¹, Fan Guobin^{2*}

(1. School of Economics and Management, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621022, Sichuan, China)

Abstract: Major science projects are significant research and development (R&D) platforms for national science and technology innovation. Studying the innovation elements and the construction of an innovation system for the entire process of science and technology R&D and project operation is crucial for exploiting the scientific benefits of major science projects. Considering the demand for constructing innovation systems for major science projects, we explored the innovation elements in the innovation activities of major science projects in different fields in China and abroad, and established an innovation system for major science projects. The Shen Guang III project of China was selected for empirical study, to provide a general paradigm for the construction of the innovation system for major science projects. The study concludes that the innovation system of major science projects is a dynamic system in which innovation subjects, innovation links, and innovation resources collaborate to achieve innovation goals under the impetus of an innovation environment; the innovation system focuses on the horizontal coordination of four innovation elements and the vertical collaboration of innovation subjects and resources. We suggest that the management practice of the innovation system for major science projects should emphasize the leading role of core innovation subjects, cross-border integration of innovation participating subjects, effective allocation of innovation resources, and dynamic changes in the innovation environment, to form an interactive innovation system with effective coordination of innovation elements and efficient implementation of innovation activities.

Keywords: major science projects; innovation system; innovation elements; collaborative innovation; innovation achievements

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-07-04

通讯作者: *范国滨, 中国工程物理研究院研究员, 中国工程院院士, 主要研究方向为工程管理; E-mail: fanguobin@caep.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“区域协同发展与国防军工领域大科学工程创新链建构研究”(2021-XY-16)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

2018年,国务院印发的《积极牵头组织国际大科学计划和大科学工程方案》提出要全面提升我国科技创新实力,提升我国在全球科技创新领域的核心竞争力和话语权 [1]。大科学工程作为科学技术突破和科技成果产出的重要载体,其建设布局对前沿科技创新、重大技术革新、原创领先成果突破以及核心技术把控具有重大战略意义 [2]。实现对国家关键核心技术的把控不仅要重视大科学工程的建设布局,还要在工程运行、科技研究等创新活动开展过程中形成各创新要素协同共生与有效互动的创新体系,以充分发挥大科学工程的科学效益。

目前,有关大科学工程创新体系建构的研究比较匮乏,现有文献多针对大科学工程创新活动中某单一要素的作用进行分析。在创新主体方面,我国大科学工程创新活动需要进一步提高企业的参与度 [2],协调好相关主体间的利益冲突 [3];在创新资源方面,必须实现对科研基地、人才队伍、技术产品、团队文化、国际合作等衍生资源进行有效整合与协同管理 [4],加强大科学工程创新资源的互通共享 [5];在创新环节方面,大科学工程建设和运行要充分创新要素的集群优势,加强对科学技术成果的转移转化 [6],提高对预制研究环节的重视 [7]。虽然现有研究已开始关注大科学工程创新活动中的相关要素,但尚未有学者对各创新要素在大科学工程建设及运行全过程中的相互联系和协同作用进行综合考虑,尚未构建形成创新要素有效协同的大科学工程创新体系。

因此,本文基于文献研究法和案例分析法,通过梳理并提炼国内外不同研究领域的代表性大科学工程创新活动中的创新要素,构建出发挥其协同互动作用的大科学工程创新体系,并选取神光-III工程进行实证研究,提出有效发挥大科学工程创新体系积极作用的工程管理启示,以期为我国大科学工程的创新体系建构提供一般范式。

二、国内外大科学工程的创新要素研究

(一) 国内外大科学工程的创新要素

1. 国外大科学工程的创新要素梳理

美国国家纳米技术计划 (NNI) 是美国在对全

球纳米科技研发现状和趋势进行3年调研后发布实施的。该计划的核心目标是保证美国在纳米技术领域的领先地位,产出有利于社会的产品和服务。NNI由美国国家科技委员会负责战略部署和主导协调,下设由美国行政部门、国家所属研究院等机构人员所组成的纳米科学、工程与技术分委会,以及负责日常行政工作和国际合作开展等活动的国家纳米技术协调办公室。在基础研究、应用研究、规模化、转移转化、商品应用等环节,NNI还涉及大学、研究机构、企业、社会机构等组织的协同参与 [8]。2003年美国《21世纪纳米技术研究开发法案》的通过,为NNI开展基础和应用研究、研究中心和基础设施建设、技术人才培养等工作提供了强有力的政策支持。

日本超大规模集成电路计划 (VLSI) 是日本政府在1973年石油危机爆发后深刻反思国家产业发展方向的背景下逐步计划实施的。为积极应对新一代微电子技术研究的挑战,VLSI计划创造性地形成了由政府主导、私营企业开展共同研究的合作局面。该计划最终由通产省电子综合技术研究所牵头,联合其国内5家计算机企业成立研究协会,设立共同研究所。研究协会设立理事会为决策主导机构,由通产省专家和各企业领导组成;研究所所长为政府所属研究所半导体领域专家,负责研发技术领导。在具体研发层面,VLSI还成立了由政府组织、企业和科研机构组成的联合实验室,负责基础研究,以及由富士通-日立-三菱、日本电器-东芝组合形成的企业实验室,负责应用研究 [9]。

国际大科学工程法国劳厄-朗之万研究所 (ILL) 是法国、德国旨在为两国科学家提供科学研究所用的高强度中子源的科研需求背景下提出建立的,后英国加入合作和管理,与法国、德国共同形成三个缔约国,西班牙、意大利、瑞士、俄罗斯等11个国家也先后参与工程的建设运营管理。ILL采用理事会管理架构,所长由德国和英国轮换,设立由法国原子能安全委员会、德国卡尔斯鲁厄核研究中心、英国科学与工程研究中心三国领域专家代表组成的指导委员会作为管理主体 [10],保障创新人才、设备、资金等资源的整合与利用;由11个参与国家专家组成的科学委员会,负责向所长提供建设建议和科研成果评估。ILL以高通量核反应堆装置为核心,交叉融合新能源、信息技术、生物医学等

多种学科,协同大学、研究机构、高科技企业、孵化器、风险资本等多个创新主体的重大技术研发平台,不断衍生新技术、新工艺、新设备,加快高新技术孕育、转化和应用。

2. 国内大科学工程的创新要素梳理

“墨子号”量子科学实验卫星工程最初是潘建伟院士为填补国内量子科学领域研究空白而提出的战略研究规划。以科研需求为指引,“墨子号”量子科学实验卫星工程经历了概念研究、工程预研、可行性分析、工程研制、建设和运行等阶段[11]。实行“首席科学家+工程总体+天地一体化实验总体组”的组织管理模式(见图1)是“墨子号”工程的创新管理特征,该管理结构实现了在首席科学家权威指导下,分系统的协同创新和创新主体的有效融合,有利于创新资源的有效整合、配置与利用。

“科学”号海洋科学综合考察船是在为保障国家海洋安全、开展海洋科学研究的背景下立项建设的。在运行管理阶段,“科学”号不仅重视专门运行管理部门的设立、运行模式和共享原则的明确、开放管理权限的规范等,还十分重视线上管理和信息系统建设。“科学”号搭建的线上运行管理平台,可实现“船时申请-航次计划管理-执行过程管理-用户服务和反馈-数据统计”的全链条线上运行管理,同时打通了与中国科学院重大科技基础设施共享服务平台评价数据的共享渠道[12],是我国大科学工程信息化建设和共享平台建设与管理创新。

上海同步辐射光源的建设是在展望国际发展趋势、洞察我国科研需求的基础上提出的。在科研管理过程中,上海光源集中深耕自由电子激光领域,在前期工程预研和科学规划的基础上,相继建设并运行了“上海深紫外自由电子激光”试验平台、“极紫外自由电子激光装置”“X射线自由电子激光

试验装置”等专业装置[13]。在科研用户合作方面,上海光源有限公司长期与中国科学院等国家级研究机构、中国科学技术大学等高等教育机构以及高新技术企业三类用户开展合作[14],并不断拓展国内外科研合作网络,近期与中国石油化工股份有限公司合作建设的“中国石化上海光源能源化工科学实验室”是我国大科学与工程与产业界合作模式的一大创新。

通过对上述国内外大科学工程管理创新活动的梳理和分析,本文将其创新要素归纳为创新主体、创新环节、创新资源、创新环境四类(见表1)。其中,创新主体是创新活动的承担者,是技术、人才、资金、平台等创新资源的主要提供者和共享者;创新环节是指创新主体所指向的创新对象,即创新主体所开展的创新活动全过程[15];创新资源是指完成创新活动所必需的条件支撑;创新环境是指影响创新主体开展创新活动的各种外部因素的总和。

(二) 大科学工程的创新要素总结

通过上述梳理分析,大科学工程的创新活动主要有创新主体、创新环节、创新资源以及创新环境四大要素。其中,创新主体是指从事创新活动的科研院所、社会组织及其中的科学家和科技工作者,既包括中国工程院、中国科学院、军事科学院等作为核心创新主体的国家科研机构,也包括其他科研机构、高等院校、创新企业等作为创新参与主体的社会组织[16],同时国家政府机构大多作为大科学工程的投资建设主体[17],为创新主体开展创新活动提供保障。创新环节是创新主体所指向的对象,包括基础研究、应用研究、成果转化、商品化及产业化五大创新活动环节;创新资源包括开展创新活动所必需的人力、物力、财力、信息、产业、合作研讨、设施、平台等资源;创新环境包括国家战略和政策法规的引导与激励,科研需求、国防军事需求和社会发展需求的突破与进步等外部环境,该类要素为创新主体、创新资源、创新环节开展协作提供着良好的科技创新氛围,推动着科技创新活动稳步高效地开展。此外,大科学工程的高效率建设和高品质运行,还需重视创新要素间的协同性,即创新主体、环节、资源等内部要素和外部创新环境要素之间的有效互动和协同共生,并不断学习借鉴国

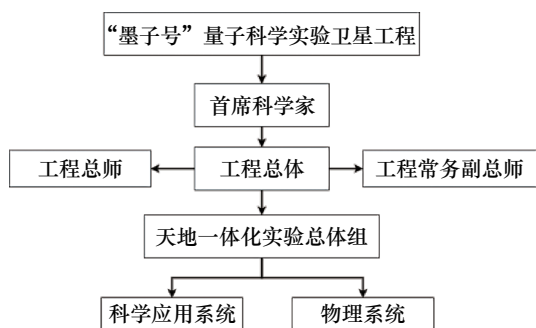


图1 “墨子号”管理结构示意图

表1 国内外大科学工程创新要素梳理

代表工程	创新主体	创新环节	创新资源	创新环境	
国外大科学工程	美国国家纳米计划 (NNI)	核心创新主体: 美国科学技术委员会 创新参与主体: 科研院所、大学、企业、产业界、社会机构等	基础研究、应用研究、规模化、转移转化、商品应用	人才、技术、资金、国际交流与合作等	国家科技战略、政策法规支持、经济社会发展需求
	日本超大规模集成电路计划 (VLSI)	核心创新主体: 通产省政府所属研究院 创新参与主体: 5大计算机产业企业等	基础与共性技术研究、技术与工艺研究、成果的产业化	人才、技术、资金、国际交流等	国家科技发展战略、产业发展需求、经济社会发展需求
	法国劳厄-朗之万研究所 (ILL)	核心创新主体: 指导委员会 创新参与主体: 各国大学、研究机构、高科技企业、孵化器、风险资本等	孕育、转化和应用	人才、设备、资金等	科研技术需求
我国大科学工程	“墨子号”量子科学实验卫星工程	核心创新主体: 中国科学院国家空间科学中心 创新参与主体: 高等院校、科研院所、大型央企、工程师团队等	工程预研、可行性验证、基础研究、项目研制与运行、应用研究	技术人才、资金、技术条件、国际交流合作	国家科技战略、科研需求、政策规划支持
	上海同步辐射光源	核心创新主体: 中国科学院 创新参与主体: 科研院所、高等院校、大型央企等	预研研究、前沿基础研究、技术开发与应用实验研究、开放运行	人才、资金、信息技术、国际交流合作	科研需求、国家科技战略、政府支持
	“科学号”海洋科学综合考察船	核心创新主体: 中国科学院 创新参与主体: 大型央企、高等院校、科研院所、建造企业等	船体设计与论证、工程建设、运行管理、成果产出	资金、专家、人才、信息技术、国际交流研讨	海洋强国战略、科研需求、国家安全需求

内外大科学工程开展有效创新活动的相关经验,发挥核心主体的主导作用,协同各创新主体实现跨领域、跨学科、跨行业的知识技术融合。

三、大科学工程的创新体系建构研究

(一) 大科学工程创新体系的理论基础

1987年,创新经济学家弗里曼首次提出国家创新体系是指聚焦于基础、应用、产业化研究的科研院所、企业等创新主体与聚焦于创新环境维护、科研成果转化的政府、技术转移中介等创新辅体循环互动,协同促进知识生产、开发、扩散与应用,所形

成的具有系统特征的整体[18~20],同时,该系统整体中的行为主体在创新链条之间的链接、协同、相互作用使创新体系呈现出动态化、网络化特征[21]。21世纪初,我国在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中提出国家创新体系是以政府为主导,发挥政策引领作用,整合配置创新资源,实现各创新主体紧密联系与有效协同,促进基础研究、应用研究、成果转化、产业化协调发展,推动国家创新体系建设与发展的社会系统。

国家创新体系的组成要素不仅包括创新活动的行为主体、各行为主体间的协同合作以及各创新要素间的相互作用,还包括政府主体制定的战略需

求、政策制度等推动国家创新体系开展创新活动的外部创新环境 [22]。中国科学院把国家创新体系构成分为技术创新体系、知识创新体系、国防科技创新体系、区域创新体系以及科技中介服务体系,其中,技术创新体系强调以创新企业为主体开展产品、工艺、服务等创新;知识创新体系强调以高校和科研机构为中心的知识融合;国防科技创新体系强调加速军民科技资源统筹配置、有效共享;区域创新体系强调区位科创优势与特色;科技中介服务体系强调科技成果的转化与扩散 [23]。随着创新改革的不断深入,又逐渐在上述体系基础上形成涵盖行为主体、创新资源和创新环境的整体布局 [24]。可见,国家创新体系不仅包括创新链条中各创新主体协同参与的创新环节 [25],还包括创新政策和市场等外部环境。

(二) 大科学工程创新体系的基本建构

大科学工程创新体系是国家创新体系建设在大科学工程项目建设方面的体现与发展。通过上述梳理,本文认为大科学工程创新体系是在国家发展战略、创新政策制度等创新环境的推动下,由核心创新主体牵头主导各创新参与主体整合协调创新资源,协同开展科技创新活动,不断实现创新目标、响应创新环境需求的动态系统。结合国内外大科学工程创新活动中的四大创新要素,本文构建大科学工程创新体系如图2所示。

横向来看,大科学工程创新体系强调创新活动开展过程中各创新要素间的协调与联系。首先,中国科学院、中国工程院、军事科学院等国家科研机

构是大科学工程的核心创新主体,牵头主导着整个创新体系的动态活动,一方面,负责保证工程的研发活动符合国家战略导向、制度条例契合上层政策法规;另一方面,负责协调高等院校、科研机构、创新企业等创新参与主体间的关系。核心创新主体和创新参与主体共同提供创新活动所需的创新资源,并进行有序整合,以便后期的统筹和调配,保障科技研发所需的人力、物力及财力。其次,创新资源经过有效配置后服务于工程研发过程的基础研究、应用研究、转移转化、商品化以及产业化等创新环节;各创新环节相互依存,基础研究是后续各研发环节的源头和基础;应用研究在前序研究的基础上探索知识和技术的应用途径;转移转化是前期研究创新成果进入商品化和产业化环节,取得科研效益、社会效益、国防和军事效益的重要转折点;在该过程中,创新活动并非单向流动,而是在不同研发环节反馈下的复杂动态过程。最后,创新活动产出的一系列科技创新成果既响应国家战略和政策法规的号召,也能满足科研需求、社会发展需求和国防军事需求,反之,外部环境引导与激励、优化和提升也不断推动着对创新目标的更高追求和创新活动的提质升级。

纵向来看,大科学工程创新体系强调创新参与主体和创新资源的构成及其对创新环节的作用。一方面,作为工程科技创新的依托单位,核心创新主体注重与知名高等院校、专业科研机构、优势科创企业和相关中介机构等创新参与主体的合作,整合并发挥各主体优势资源,有针对性地融入到各环节的创新活动中,一般而言,高等院校和科研机构主

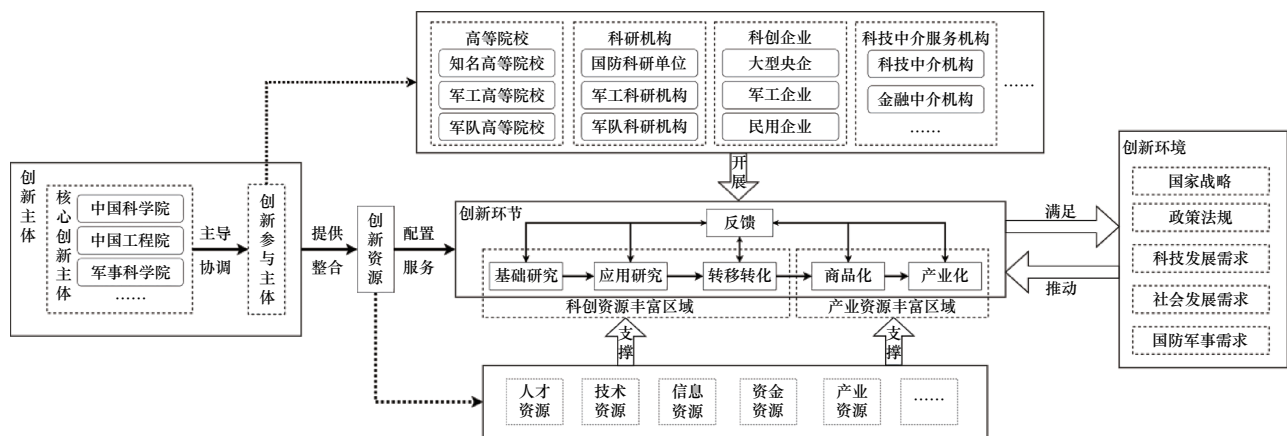


图2 大科学工程创新体系

要参与基础研究环节；高等院校、科研机构和创新企业主要参与应用研究、转移转化、商品化环节；创新企业主要参与产业化环节；科技中介服务机构则融入创新环节全过程。另一方面，人才、技术、资金、信息、产业等创新资源支撑着全过程创新活动的开展，同时，创新资源对创新环节的支撑作用存在较强的区位优势，一般而言，科技创新资源丰富的区域更能有效地开展基础研究、应用研究和转移转化三个知识密集型环节的创新活动，因为这类区域布局了大量的高等院校和科研机构，拥有更多的专业人才和科学技术，能获得更多的专项资金支持；而产业资源丰富的区域因拥有更多工业、制造业等创新企业，更能保障创新活动的商品化和产业化阶段。

四、大科学工程创新体系案例分析

中国工程物理研究院建设并运行的神光-III工程是我国的一项重要大科学工程，涉及多种交叉学科，融合上百项高新技术和创新研究。神光-III激光装置的出光和运行使我国成为继美国之后，国际上第二个研发、建设并运行新一代高功率激光驱动器的国家，对提升我国军事硬实力、抢占激光科技前沿领域、保障我国国防和整体安全具有重要意义。因此，本文选取神光-III工程为案例，分析该工程的四大创新要素的形成历程，构建其创新体系，最终凝练出神光-III工程创新成就对大科学工程创新体系建设的管理启示。

（一）神光-III工程创新要素

1. 创新主体

中国工程物理研究院激光聚变研究中心作为神光-III工程实施的责任主体和核心创新主体，全面负责神光-III工程建设实施和运行，协同全国200余家优势机构和单位开展融合物理学、光学工程、核科学与技术等多学科交叉的技术攻关，涵盖科学、技术、工程等专业领域。

充分考虑神光-III装置所具有的多学科交叉、技术难度高、专业协作性强等特性，其项目团队在管理过程中创新性地构建了“外协合作联盟”，其中多数合作单位为与“神光”系列装置建设过程中建立起长期合作关系的科研机构、军工集团、高等院校

和国有企业。神光-III装置的创新主体具体包括中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院光电技术研究所等专业化研究机构；哈尔滨工业大学、国防科技大学、华中科技大学、清华大学等科技实力雄厚的知名高等院校；中国五冶集团有限公司、西安航空动力股份有限公司、北京国科世纪激光技术有限公司等大型企业 [26]。装置建设后期，在“成德绵一体化”的行政区划大背景下，神光-III工程建设也注重与所在区域中如中国科学院光电技术研究所、中国工程物理研究院相关研究所、中国兵器装备集团自动化研究所等研究机构；四川大学、电子科技大学、西南科技大学等高等院校；中国第二重型机械集团公司、长征机械厂、成都光明光电股份有限公司等国有企业开展协同创新，以此辐射并引领“成德绵”区域的科技产业发展 [27]。此外，在国家发展战略引导下，神光-III装置建设不仅整合了上述创新主体的专业技术优势，还在产业链上积极调动民营企业和科研生产机构的参与，形成了军民协同创新的元器件研发和生产体系 [28]。

2. 创新环节

自2007年2月在中国工程物理研究院开工奠基以来，神光-III工程扎根于基础研究、应用研究、转移转化、商品化和市场化的创新环节全过程。创新主体在基础研究、技术攻关、产品研发等方面取得了较大突破，例如四川大学开展了靶丸制备技术研究、靶参数测量技术研究等；电子科技大学开展了快点火基础物理和模拟技术研究、Z箍缩基础问题研究等；西南科技大学开展了靶丸制备技术研究、冷冻靶温度场分布理论模拟研究等。相关研究机构和企业开展的关键核心技术攻关和生产线建设，不仅满足了工程项目本身的需要，还大幅提升了相关产业的技术与装备水平，形成了产品竞争力增强与生产能力扩大的良性循环，大口径、高质量熔石英、K9光学材料、大口径高精度金刚石车床等高端研发产品不仅填补了国内市场空白，还打破了国际壁垒，促进了科技成果的产出、市场化和产业化 [27]。

3. 创新资源

激光惯性约束聚变研究长期以来备受国家重视，在专家团队、专项资金、专业设备等创新资源的支持下，该领域研究取得了巨大突破。聚焦来看，神光-III工程所处的“成德绵”地区是四川省

内科技人才、研发资金和专利申请分布最集中的区域，为工程的建设和运行提供了大量的资金、技术、人才、信息等创新资源支撑，为开展激光聚变研究奠定了坚实基础。

同时，神光-III工程管理部门的协调推动，打破了科学、技术、工程等各领域创新要素相互分离、自成体系的独立格局，优化了科技创新资源配置，提高了科技创新资源要素利用效率，减少了资源要素重复投资和闲置浪费等现象。

4. 创新环境

我国的激光惯性约束聚变研究早在1983年国家高技术研究发展计划（“863计划”）中就已立项建立，并在国家层面上得到了长期稳定的支持。在我国创新驱动发展战略、科教兴国战略和国防军事战略的顶层规划下，实现新时代激光聚变研究关键核心技术的自主可控已成为提升我国科技创新实力的现实需要。

先进制造业作为我国制造业的发展方向，对我国国民经济发展和国防建设有着举足轻重的作用。在先进光学制造领域，以神光-III为代表的工学类大科学与工程我国先进光学制造业现已形成“工程自主创新成果带动制造产业技术发展，产业核心竞争力提升推动工程战略目标最大化”的双向驱动效应。一方面，先进光学制造不断攻关光学技术难题，为神光-III等大科学工程建设提供元器件支持；另一方面，神光-III等工学类大科学与工程的发展，为提升我国光学制造水平提供了有力的技术支撑[29]。神光-III工程的创新要素如表2所示。

（二）神光-III工程的创新体系建构

基于上述分析，本文构建神光-III工程创新体系如图3所示。神光-III工程涉及学科广泛、创新任务艰巨、创新活动复杂，其创新活动不仅有赖于国

家战略部署、科技政策规划和市场产品需求等宏观环境的推动，还有赖于核心创新主体中国工程物理研究院相关研究所的组织与决策，主导各创新参与主体相互协作、协调各创新资源合理分配、实现资源与利益共享、提高关键技术突破和成果转化效率、带动区域经济和 Related 产业发展。具体而言，神光-III工程在中国工程物理研究院的引导与协调下，各创新参与主体积极协同开展基础研究、应用研究、转移转化、商品化和产业化等环节的创新活动，取得了显著的科学效益和技术创新成果，与我国先进制造领域发展形成了产业需求推动技术攻关与工程需求拉动产业升级的双向驱动机制[29]，赋能国家发展战略，提升我国科技竞争实力。综上所述，本文构建的大科学与工程创新体系在国防军工领域的大科学工程中也能得到有效应用。

（三）神光-III工程的创新成就及管理启示

1. 神光-III工程的创新成就

神光-III激光装置是目前亚洲第一、世界第二大的激光驱动装置，代表着我国光学、激光、脉冲功率、精细机械、快电子学、自动控制、化学清洗、超精密加工等一系列学科领域的最高发展水平，是我国激光惯性约束聚变研究最重要的科研平台[30]。神光-III激光装置的成功研制使我国高功率固体激光领域的科技研发取得了突破性成就，例如掌握了高功率固体激光装置的总体设计和总体集成的方法与技术，实现了总体设计与验证、批量安装集成的系统化、流程化以及规范化；构建了标准化、模块化和一体化的高功率固体激光装置结构框架以及多层次的装置性能指标体系；掌握了高功率固体激光装置主体结构的设计、制造、调试等环节的关键技术与工艺；研制并突破了高功率固体激光装置大口径光学元器件的关键核心技术等。总之，

表2 神光-III工程创新要素

	创新主体	创新环节	创新资源	创新环境
神光-III工程	核心创新主体： 中国工程物理研究院、中国工程物理研究院激光聚变研究中心等相关研究所 创新参与主体： 高等院校、研究机构、大型国企、民营企业、科研生产单位	基础研究、应用研究、转移转化、商品化和市场化	资金、技术、专家、人才、设备等	国家创新驱动发展战略、科教兴国战略、国防军事战略、先进光学制造领域的发展需求、政策规划支持等

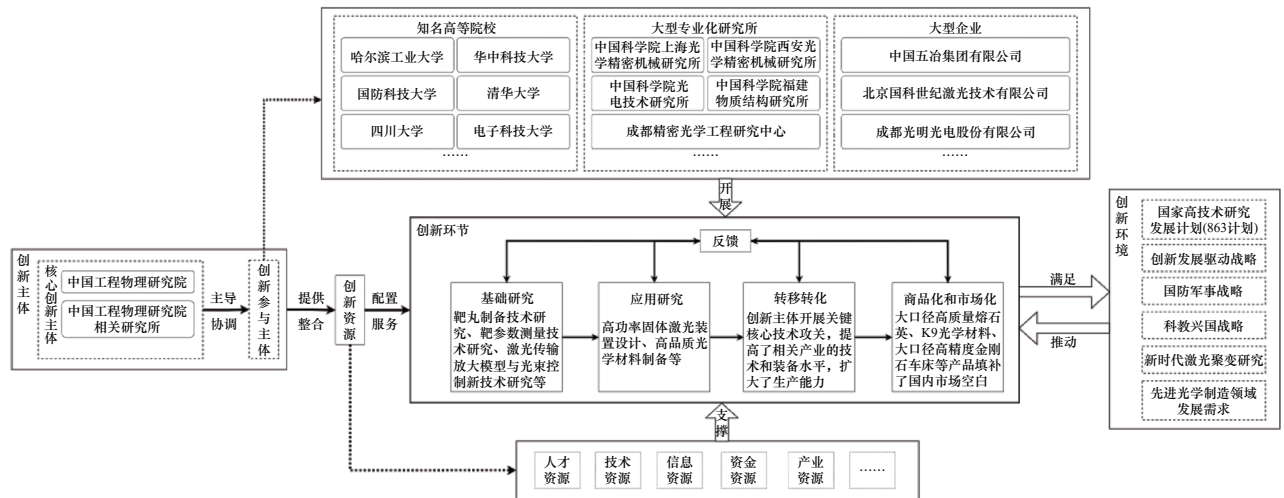


图3 神光-III工程创新体系

神光-III工程集中体现了我国高功率固体激光技术与工程领域的进步。

2. 大科学工程实践管理启示

神光-III工程的管理实践表明，大科学工程创新体系不仅要求四大创新要素齐全，同时还需厘清各创新要素间的内在联系和逻辑，形成创新要素有效协同、创新活动高效开展的互动创新体系，以此发挥大科学工程创新体系的积极作用，助力我国科技创新研究，服务经济社会发展。本文凝练管理启示如下。

有效发挥核心创新主体的主导作用。积极发挥国家科研单位及机构等核心创新主体对大科学工程的主导作用。借鉴国外大科学工程建设的理事会管理架构，建立顶层核心管理决策机构，及时落实科技政策，有效配置科技资源。同时根据工程项目特色，合理规划项目实施层的组织架构，建立符合工程特点的管理运行体系，实现工程建设与运行全过程的有效决策、管理和协调。

切实深化创新参与主体的跨界融合。大科学工程的科学技术攻关涉及到众多领域和学科，一方面，进一步深化研发过程中不同行业领域、不同学科背景的高等院校、科研院所、创新企业等的协同参与；另一方面，培养和引进专业知识过硬和管理知识丰富的复合型人才，科学管理工程建设和运行各阶段，形成工程研发顺利攻关、机构能力稳步提升的双赢局面。

加强各环节创新资源的有效配置。发挥我国“集中力量办大事”的新型举国体制优势，对各地

区、各主体分散的创新资源，先整合规划后合理配置。加强工程建设各管理机构的人力资源配置，尤其是核心管理决策机构的专家院士、复合型人才等。充分考虑并发挥各区域、各主体的创新资源优势，将其合理分配于创新活动，更好发挥创新资源对全过程创新活动的支撑作用。

重视宏观战略及环境的动态变化。创新主体要实时关注国家战略引导和相关政策激励，洞悉与工程研究领域相关的科研需求、国防军事需求和社会发展需求，洞察国内外相关领域的发展前景和趋势，设立科学的发展目标，积极开展创新活动，产出能满足并服务于上述需求的创新成果。同时，重视创新环境的变化对创新主体确立更高创新目标、持续开展创新活动的正向推动，完善和改进大科学工程的科学技术性能，进一步助力大科学工程科学研究效益、社会效益与国防军事效益的提升。

五、结论与展望

本文通过梳理并提炼国内外不同研究领域的代表性大科学工程创新活动中的创新要素，构建出发挥其协同互动作用的大科学工程创新体系，并选取神光-III工程进行实证研究，提出有效发挥大科学工程创新体系积极作用的工程实践管理启示，为我国大科学工程的创新体系建构提供了一般范式。本文的主要研究结论如下。

第一，大科学工程创新体系是在国家发展战略、创新政策制度等创新环境的推动下，由核心创

新主体牵头主导、各创新参与主体整合协调创新资源, 协同开展科技创新活动, 不断实现创新目标、响应创新环境需求的动态系统。

第二, 大科学工程创新体系注重创新要素的横向协调与纵向协同。横向来看, 大科学工程创新体系强调创新活动开展过程中各创新要素间的协调与联系; 纵向来看, 大科学工程创新体系强调创新参与主体和创新资源的构成及其对创新环节的作用。

第三, 大科学工程创新体系的管理实践需重视核心创新主体的主导作用、创新参与主体的跨界融合、创新资源的有效配置以及创新环境的动态变化, 以此形成创新要素有效协同、创新活动高效开展的互动创新体系。

尽管本文对大科学工程创新体系的建构研究做出了积极探索, 但也存在一些不足: 仅选取了具有代表性的国内外大科学工程案例展开分析; 未能对大科学工程创新体系的监督机制进行研究。未来研究可以在本文研究结论的基础上进行深入, 一方面可深入研究大科学工程创新链与资金链的融合效应及其对大科学工程科学、经济与社会效益的影响; 另一方面可引入“生态学”理论研究大科学工程的创新生态系统, 探究各创新要素达到“竞合共生”平衡状态、实现创新收益最大化的方式路径。

致谢

感谢陈晓红院士、刘合院士、王传珂高级工程师等为提高本文质量所提出的宝贵意见和建议。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 10, 2022; **Revised date:** July 4, 2022

Corresponding author: Fan Guobin is a research fellow from the China Academy of Engineering Physics and member of the Chinese Academy of Engineering. His major research field is engineering management. E-mail: fanguobin@caep.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Construction of Innovation Chain for Major Science Projects in Coordinated Regional Development and National Defense and Military Fields” (2021-XY-16)

参考文献

[1] 国务院关于印发积极牵头组织国际大科学计划和大科学工程方案的通知 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2018 (10): 17-20. Notice of the State Council on the issuance of the program of actively leading the organization of international large science

programs and large science projects [J]. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2018 (10): 17-20.

[2] 匡光力, 汪文强. 聚焦我国大科学工程发展问题的管理建议 [J]. 科学与社会, 2021, 11(1): 1-11. Kuang G L, Wang W Q. Focusing on the management suggestions of China's big science project development problems [J]. Science and Society, 2021, 11(1): 1-11.

[3] 李克龙, 徐飞. 大科学工程中多元主体的利益冲突及其解决——以 500 米口径球面射电望远镜工程为例 [J]. 科学与社会, 2021, 11(1): 61-71. Li K L, Xu F. Conflict of interests of multiple subjects in big science projects and its resolution—Taking the 500-meter spherical radio telescope project as an example [J]. Science and Society, 2021, 11(1): 61-71.

[4] 陈套. 大科学工程衍生资源的协同管理 [J]. 科学与管理, 2014, 34(5): 10-14. Chen T. Collaborative management of resources derived from large scientific projects [J]. Science and Management, 2014, 34 (5): 10-14.

[5] 曾刚, 王传珂, 淡晶晶, 等. 大科学工程关键技术自主可控的有效路径建议——以激光聚变研究科学工程为例 [J]. 中国管理信息化, 2020, 23(15): 140-143. Zeng G, Wang C K, Tan J J, et al. Effective path proposal for autonomous and controllable key technologies of large scientific projects: The example of laser fusion research science project [J]. China Management Information, 2020, 23(15): 140-143.

[6] 陈套. 重大科技基础设施内涵演进与发展分析 [J]. 科学管理研究, 2021, 39(5): 21-26. Chen T. Analysis on the connotation evolution and development of major scientific and technological infrastructure [J]. Scientific Management Research, 2021, 39(5): 21-26.

[7] 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, 17. Wang Y F, Bai Y X. Develop national major scientific and technological infrastructure to lead international scientific and technological innovation [J]. Management World, 2020, 36(5): 172-188, 17.

[8] 樊春良, 李东阳. 新兴科学技术发展的国家治理机制——对美国国家纳米技术倡议 (NNI) 20 年发展的分析 [J]. 中国软科学, 2020 (8): 55-68. Fan C L, Li D Y. National governance mechanisms for emerging science and technology development: an analysis of 20 years of development of the National Nanotechnology Initiative (NNI) in the United States [J]. China Soft Science, 2020 (8): 55-68.

[9] 李维维, 于贵芳, 温珂. 关键核心技术攻关中的政府角色: 学习型创新网络形成与发展的动态视角——美、日半导体产业研发联盟的比较案例分析及对我国的启示 [J]. 中国软科学, 2021 (12): 50-60. Li W W, Yu G F, Wen K. The role of government in key core technologies: a dynamic perspective on the formation and development of learning innovation networks: A comparative case study of semiconductor industry R&D alliances in the United States and Japan and implications for China [J]. China Soft Science, 2021 (12): 50-60.

[10] 杨新荣. 劳厄-朗之万研究所创建 20 年 [J]. 国外核新闻, 1987 (8): 6-7.

- Yang X R. Twenty years of the Lauer-Ranzmann institute [J]. *Foreign Nuclear News*, 1987 (8): 6–7.
- [11] 张志会, 马连轶. “墨子号”量子科学实验卫星大科学工程的历史与管理模式探究 [J]. *中国科技论坛*, 2018 (11): 1–8.
Zhang Z H, Ma L Y. Exploring the history and management mode of the “Mozi” quantum science experiment satellite big science project [J]. *China Science and Technology Forum*, 2018 (11): 1–8.
- [12] 姜秋富, 尹宏, 曾钢, 等. 基于“科学”号线上运行管理平台的我国海洋科学考察船信息化建设 [J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36 (10): 69–72.
Jiang Q F, Yin H, Zeng G, et al. Information construction of China’s marine scientific research vessels based on the operation and management platform on board the “Science” line [J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(10): 69–72.
- [13] Zhao W J. Zhentang Zhao: Past and future of the Shanghai synchrotron radiation facility [J]. *National Science Review*, 2021, 8 (12): 122–125.
- [14] 张玲玲, 赵明辉, 曾钢, 等. 文献计量视角下依托大科学装置的学科主题与合作网络研究——以上海光源为例 [J]. *管理评论*, 2019, 31(11): 279–288.
Zhang L L, Zhao M H, Zeng G, et al. A study of disciplinary themes and collaborative networks relying on large scientific devices from a bibliometric perspective: Shanghai Light Source as an example [J]. *Management Review*, 2019, 31(11): 279–288.
- [15] 王玉冬, 刘雪蕾, 李思泓. 高新技术产业创新链与资金链融合机理综述 [J]. *财会通讯*, 2021 (12): 19–23, 48.
Wang Y D, Liu X L, Li S H. A review of the mechanism of integration of innovation chain and capital chain in high-tech industry [J]. *Finance and Accounting Communication*, 2021 (12): 19–23, 48.
- [16] 尹西明, 陈劲, 贾宝余. 高水平科技自立自强视角下国家战略科技力量的突出特征与强化路径 [J]. *中国科技论坛*, 2021 (9): 1–9.
Yin X M, Chen J, Jia B Y. The salient features and strengthening path of national strategic science and technology force from the perspective of high-level science and technology self-reliance and self-improvement [J]. *China Science and Technology Forum*, 2021 (9): 1–9.
- [17] 中国社会科学院工业经济研究所课题组, 张其仔. “十四五”时期我国区域创新体系建设的重点任务和政策思路 [J]. *经济管理*, 2020, 42(8): 5–16.
GroupResearch, Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Zhang Q Z. Key tasks and policy ideas for the construction of China’s regional innovation system in the 14th Five-Year Plan period [J]. *Economic Management*, 2020, 42 (8): 5–16.
- [18] Freeman C. *Technology policy and economic performance: Lessons from Japan* [M]. London: Pinter Publishers, 1987.
- [19] OECD. *National innovation systems* [R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 1997.
- [20] 雷小苗, 李正风. 国家创新体系结构比较: 理论与实践双重视角 [J]. *科技进步与对策*, 2021, 38(21): 8–14.
Lei X M, Li Z F. Comparison of national innovation system structures: A two-dimensional perspective of theory and practice [J]. *Science and Technology Progress and Countermeasures*, 2021, 38 (21): 8–14.
- [21] 严锦梅, 刘戒骄. 系统视角下国家创新体系中的政府作用——基于美国和日本创新实践综述 [J]. *中国科技论坛*, 2022 (2): 50–58.
- Yan J M, Liu J J. The role of government in national innovation system from a system perspective: A review of innovation practices based on the United States and Japan [J]. *China Science and Technology Forum*, 2022 (2): 50–58.
- [22] 薛晓光, 宋旭超. 国家创新体系文献述评 [J]. *产业经济评论*, 2016 (5): 82–92.
Xue X G, Song X C. A review of the literature on national innovation systems [J]. *Industrial Economics Review*, 2016 (5): 82–92.
- [23] 孙丽琛. 欧盟国家创新体系构建及其效果分析 [D]. 广州: 广东外语外贸大学(硕士学位论文), 2021.
Sun L C. Analysis of the EU national innovation system and its effectiveness [D]. Guangzhou: Guangdong University of Foreign Studies (Master’s thesis), 2021.
- [24] 余江, 管开轩, 李哲, 等. 聚焦关键核心技术攻关强化国家科技创新体系化能力 [J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(8): 1018–1023.
Yu J, Guan K X, Li Z, et al. Focusing on key core technologies to strengthen the capacity of national science and technology innovation system [J]. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(8): 1018–1023.
- [25] Freeman C. *Economics of industrial innovation* [M]. London: Routledge, 2013.
- [26] 王成程, 何伟, 郑万国, 等. 神光-III项目外协合作联盟的建立与管理实践 [J]. *项目管理技术*, 2016, 14(7): 98–101.
Wang C C, He W, Zheng W G, et al. Establishment and management practices of the Shen Guang-III project outsourcing cooperation alliance [J]. *Project Management Technology*, 2016, 14(7): 98–101.
- [27] 王传珂, 淡晶晶, 刘兰, 等. 大科学工程对成德绵区域科技产业的辐射引领作用——以新时代激光聚变研究为例 [J]. *成都行政学院学报*, 2018 (5): 21–24.
Wang C K, Tan J J, Liu L, et al. The radiation leading role of large scientific projects on the science and technology industry in Chengdu, Germany and Mianyan region—The new era laser fusion research as an example [J]. *Journal of Chengdu Administrative College*, 2018 (5): 21–24.
- [28] 淡晶晶, 徐隆波, 莫磊, 等. 大科学工程牵引下的军民融合协同创新机制分析——以高功率巨型激光驱动装置为例 [J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2019, 11(1): 40–48.
Tan J J, Xu L B, Mo L, et al. Analysis of collaborative innovation mechanism of military-civilian integration under the traction of large scientific projects—Taking high-power giant laser drive device as an example [J]. *Engineering Research—Engineering in Interdisciplinary Perspective*, 2019, 11(1): 40–48.
- [29] 淡晶晶, 王传珂, 贺少勃, 等. 大科学工程与先进制造业的双向驱动效应研究——以高功率固体激光装置研制为例 [J]. *工程研究——跨学科视野中的工程*, 2018, 10(5): 479–487.
Tan J J, Wang C K, He S B, et al. A study on the two-way driving effect of big science engineering and advanced manufacturing industry—A case study of high-power solid-state laser device development [J]. *Engineering Research—Engineering in Interdisciplinary Perspective*, 2018, 10(5): 479–487.
- [30] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, et al. Laser performance of the SG-III laser facility [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4(3): 5–12.