doi. 10. 3724/1005-0566. 20251007

大科学设施建设的风险与因应研究

张珺皓[1,2]

（1. 吉林大学法学院，吉林　长春 130015；2. 吉林大学理论法学研究中心，吉林　长春 130015）

摘　要：大科学设施是大科学时代国家科技创新体系的核心基础设施，对其进行系统研究能够助力我国科技实力迭代和在全球科技竞争中掌握主动权。大科学设施具有高投入、长周期、高复杂性等特征，在建设过程中广泛面临技术、管理、资源及政策环境等多维风险。在国际经验方面，美国采取技术领先的冷战思维模式，欧盟推行超国家合作模式，日本则实行科技政策引导模式。基于域外镜鉴和我国国情，可构建包括制度优势赋能的总体治理体系、战略导向引领的风险前置机制、新型举国体制支撑的组织攻关机制、数字化驱动的智能风控体系、有序开放中的风险边界管理在内的“五位一体”风险应对路径。大科学设施建设的中国之治彰显出其作为国家治理体系和治理能力现代化在科技战略前沿的制度价值，可构建出具有自主性、开放性与国际影响力的风险治理理论体系。

关键词：大科学设施；风险；治理；科技竞争力

中图分类号：F920. 0　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005 - 0566（2025）10 - 0073 - 10

Research on the risks and countermeasures in the construction of large-scale scientific facilities

ZHANG Junhao[1,2]

（1. *School of Law*, *Jilin University*, *Changchun* 130015, *China*;

2. *Centre for the Study of Theoretical Law*, *Jilin University*, *Changchun* 130015, *China*）

Abstract: Large-scale scientific facilities represent the core infrastructure of the national science and technology innovation system in the era of big science. Systematic research on these facilities can enhance the iterative upgrading of China's scientific and technological strength and enable the country to gain the initiative in global technological competition. Characterized by high investment, long cycles, and high complexity, large-scale scientific facilities face multi-dimensional risks during their construction process, including those related to technology, management, resources, and the policy environment. From the perspective of international experience, the United States has adopted a Cold War-style approach centered on technological leadership, the European Union has pursued a supranational cooperation model, while Japan has implemented a science and technology policy-oriented model. Drawing upon these external references and China's national conditions, a "five-in-one" risk response pathway can be established, consisting of: an overall governance system empowered by institutional advantages; a risk prepositioning mechanism guided by strategic orientation; an organizational breakthrough mechanism supported by a new type of nationwide

收稿日期：2025-05-18　　**修回日期**：2025-08-06

基金项目：国家社会科学基金重大项目“推动新质生产力发展的法律保障研究”（24&ZD131）；教育部哲学社会科学研究重大专项项目“社会主义法治建设实践与中国自主法学知识体系构建”（2023JZDZ012）；吉林省教育厅博士研究生科研创新能力提升项目（社科类）“社科法学的基础理论研究”（JJKH20250016BS）。

作者简介：张珺皓（1997—），男，四川成都人，吉林大学・法学院、理论法学研究中心博士研究生，研究方向为数字法学和中国自主法学知识体系。

system; an intelligent risk management system driven by digitalization; and a risk boundary management approach under orderly openness. The governance of large-scale scientific facility construction in China demonstrates its institutional value as part of the modernization of the national governance system and governance capacity at the frontier of science and technology strategy. It further provides the foundation for constructing a risk governance theoretical system that is autonomous, open, and internationally influential.

Key words: large-scale scientific facilities; risk; governance; scientific and technological competitiveness

习近平总书记指出,“世界已经进入大科学时代,基础研究组织化程度越来越高,制度保障和政策引导对基础研究产出的影响越来越大。我国支持基础研究和原始创新的体制机制已基本建立但尚不完善,必须优化细化改革方案,发挥好制度、政策的价值驱动和战略牵引作用”[1]。大科学设施的利用,并未随着冷战和核时代的结束而终止。相反,“大科学”经历了转型与更新,过去几十年,涌现出一系列新的大科学项目,与当前科学(及创新)政策的偏好和社会对科学的期待密切相关[2]。大科学设施在规模、复杂性和投资强度上均呈现出前所未有的特点。人类已经进入大科学时代[3]。然而,大科学设施建设过程中面临着复杂的风险挑战,若不能得到有效识别、评估和应对,将可能导致项目延期、成本超支,甚至功能缺失或失败,进而影响国家科技创新能力的提升。

国际上,大科学工程风险管理研究已积累了丰富成果。有学者对全球 312 个大型科学基础设施项目的系统分析揭示,85% 的项目存在成本超支,平均超支率达 53%,进度延误普遍超过 36 个月,其根本原因在于“乐观偏差”和战略性低估[4]。Merrow[5]通过追踪 30 年间建设的大型科技工程,建立了“复杂度—风险矩阵”理论框架,指出技术复杂性与组织复杂性的交互效应是风险放大的核心机制。与此相对应地,Miller 等[6]提出了大科学工程“动态风险治理”模型,强调风险评估的持续迭代与情境适应性。

当前,我国学者从多个维度对大科学设施的风险类型、治理机制和制度安排进行了探讨,逐步形成了较为初步的研究体系。在风险认知与类型识别方面,林娴岚[7]在对中美国际大科学合作战略选择的比较中指出,领先国家对大科学合作参与的保守性,实则反映了其对科研安全与战略控制风险的高度敏感性。在治理制度与组织机制方面,学者普遍关注治理结构设计对风险防控的关键作用。例如,基于行动者网络理论,周燕等[8]通过对珠三角大科学设施的调研,提出设施项目的多主体协同构建过程需经过多轮“角色固化—网络激活—利益协调”的互动博弈,其中任何一环出现信息不对称或协调失灵,均可能引发管理性风险。邓泉等[9]以 CRAFT 为例指出,“两步并一步”的审批创新、“院地共建”的组织模式、主辅分离的工程推进机制等实践,是提高治理灵活性、降低制度摩擦的重要探索,体现出制度创新在风险管理中的核心作用。在治理困境与制度改革层面,有学者提出了更为结构性的批判与反思。例如,黄振羽[10]从“行政发包”的视角出发,认为高校大科学装置治理不能缺少政府的控制权,否则将在权力分配、经济激励和考核控制上失衡。又如,李志遂等[11]认为大科学装置(集群)是一个生态系统,主要由创新、金融、政策三大群落构成,即大科学设施的运行以三大群落及其相互影响的机制所支撑。张毅等[12]从演化动力学视角出发,认为外部压力、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,世界上主要的大科学的技术创新演化可分为美国、中国、欧洲、日本和苏联 5 种模式。

基于以上研究基础可知:一是现有研究只是零星地涉及某地域、某角度的大科学设施的风险,并未能够对其进行系统性的研判和总结;二是在风险因应上,大科学设施风险治理的中国特色还有进一步拓展的空间,应加强明确中国作为后发国家的定位。因此,本文将从技术特征与战略地位、风险剖析、域外镜鉴和中国路径 4 个方面展开论证,探索基于我国国情的综合性的大科学设施风险管理理论框架。

一、大科学设施的技术特征与战略地位

(一)大科学设施的技术特征

大科学设施往往超越单一机构的能力范围,通常需要国家层面的统筹协调与资源整合,才能

建设和运行大型科研装置或设施群[13]。为展开大规模科学研究,大科学设施是不可或缺的支撑平台,包括核心设备装置及其配套的支撑体系[14]。

大科学设施具有一系列鲜明特征,与常规科研设备和基础设施存在明显区别。首先,具有显著的资源聚集效应。由于其技术规格高和系统复杂,大科学设施自然构成高价值的科研综合体[15]。其次,大科学设施具备大规模特性(包括物理、财政与技术维度),对于科学研究具有特殊重要性,能够推动特定专业领域的突破性进展[16]。大科学设施建设与运行成本极其高昂[2]。再次,具有鲜明的开放共享特性,强调面向全球科学共同体开放。甚至有学者认为,有关大科学设施的风险治理和管理研究属于协作型与开放式科学(collaborative and open science)[17]。最后,大科学设施具有显著的溢出效应和带动作用[18],能够带动相关产业发展、促进区域创新能力提升[19]。

(二)大科学设施在科技创新中的战略地位

第一,大科学设施构成开展前沿科学研究的重要基础平台。大科学设施为科学家提供了接近自然极限条件的实验环境,极端条件在常规实验室环境中难以实现,而建设大科学设施正是为了突破这一瓶颈,开辟科学研究的新领域。大科学设施推动了实验方法和技术手段的革命性变革。回望科学史,每一代重大科学设施的落成,几乎都带来了相应科学范式的革新。此外,大科学设施为不同学科融合与碰撞提供了土壤,促进不同学科间的知识迁移和方法共享,催生出一系列富有活力的跨学科研究方向。

第二,大科学设施可以有效贯通基础研究与应用研究。借助大科学设施,科研人员更容易发现潜在的科研热点[20]。同时,大科学设施可以成为人才孵化器,科技人才因大科学设施而聚集,也因其良好科研氛围和高水平研究团队而得到培养[21]。

第三,随着全球科技竞争日趋激烈,大科学设施已成为衡量一个国家科技实力与国际影响力的重要尺度。一方面,拥有若干世界级的大科学设施,意味着在相关前沿领域具备了开展深度探索的基本条件,可以深度参与国际科技竞争。当前,包括美国、欧盟、日本在内的科技强国和地区,纷纷将大科学设施建设列为科技战略的核心组成部分,持续投入大量资源用于设施的建造与升级[22]。另一方面,大科学设施也是掌握国际科技话语权的重要依托。在多个前沿科学领域,拥有领先的大科学设施的国家往往在规则制定与研究议题设置中占据主动权。此外,大科学设施还是国际科技合作的重要桥梁。随着科学研究复杂度和资源需求的不断攀升,各国通过合作共建、共享大科学设施,已成为不可逆转的发展趋势。

二、大科学设施建设风险的多维分析

对待大科学设施及其风险,应持有“谨慎乐观”的态度[23]。乐观在于,如前所述,大科学设施作为核心设施能够推动科学技术的不断发展;谨慎在于,不注重大科学设施的风险分析和应对将会使得技术走向人类的反面。

(一)技术风险维度

1. 前沿技术实现的不确定性

大科学设施作为科学前沿领域的重要实验平台,其建设往往涉及诸多尚未成熟的前沿技术,技术的实现具有本质上的不确定性。一是在技术成熟度预估方面,大科学设施项目前期规划阶段往往难以准确评估关键技术的实际成熟程度。例如,国际热核聚变实验堆项目在立项之初,对超导磁体和氚增殖包层等关键技术的成熟度评估过于乐观,实际建设过程中发现这些技术距离工程应用尚有较大距离,导致项目反复调整设计方案,进度滞后数年[24]。二是在理论到实践的转化过程方面,实验室环境中验证的技术原理在大型工程环境中往往面临诸多未知因素。三是在技术边界的不确定性方面,大科学设施往往处于人类知识的边界地带,某些关键技术能否实现、能够实现到何种程度,存在本质上的不确定性。不同于一般工程项目中的技术风险,它源于科学本身的未知性,难以通过常规风险管理方法完全规避。

2. 系统集成与接口复杂性风险

首先,不同的耦合关系导致任何子系统的变更都可能引发连锁反应,大大增加了系统集成的复杂性和不确定性。接口标准的协调难度在国际合作项目中尤为突出。由多国共同建设的大科学设施往往面临标准体系不统一的问题[25]。著名的

火星气候轨道器失败事件就源于美制和欧制单位换算错误,造成巨大损失[26]。其次,系统整体性能的涌现特性则使大科学设施的系统集成风险具有难以预测性。复杂系统往往表现出涌现行为,即整体系统呈现出的某些特性无法从各子系统的性能简单推导,必须通过系统级测试和验证才能识别并解决潜在问题。然而,大科学设施的规模和复杂性往往使得全系统测试成本高昂,甚至在某些情况下技术上不可行,从而进一步增加了系统集成的风险。

(二)管理风险维度

1. 项目组织与协调风险

大科学设施项目通常汇聚政府部门、科研院所、高校与企业等多类主体,各方在设施定位、资源分配、技术路线等核心议题上常有不同立场,使得台址选择、技术标准统一等关键决策协调难度加大,往往导致决策周期拉长、推进效率不高。从纵向来看,大科学设施普遍采用多层级的科层式管理结构,从国家决策机构延伸至具体技术团队,信息在逐级传递中容易发生过滤、简化,甚至曲解,影响最终决策的准确性[27]。从横向来看,不同设施之间的数据共享机制不畅,也给科研人员整合利用跨领域数据带来实际困难[28]。由于技术高度交叉、子系统界面复杂,各参与方之间的责任边界往往不够清晰,从而为项目协调带来潜在隐患。

2. 进度与质量控制风险

大科学设施项目在进度规划上常存在乐观偏差,即规划者倾向于低估项目的复杂性与不确定性。原因既有争取立项的策略性动机,也有设施本身探索性强、难以精确预估的因素。在质量控制方面,大科学设施需兼顾科学性能、工程可靠性与用户友好性等多个维度,而各指标之间往往相互制约,难以简单量化评估,部分关键性能指标只有在系统整体运行后方能验证。在面临进度压力时,管理者常常面临是否牺牲部分质量要求以保证工期。就大科学设施而言,建设周期长、投资大,管理者承受着进度延误和阶段性考核的压力。

3. 人才团队建设与管理风险

大科学设施的建设与运行高度依赖具备交叉学科背景和工程实践能力的高端人才,而此类复合型人才本身就十分稀缺。例如,精通大型复杂工程管理的专业人才却往往短缺,导致科学目标与工程实现之间衔接不畅。大科学设施从概念提出到建成运行往往历时数十年,维持核心团队在如此长周期内的稳定性极为困难。不同学科背景人才之间的专业语言差异也是常见问题。物理学家、工程师、项目管理者对同一技术问题可能有完全不同的理解和表达方式[29]。

(三)资源风险维度

1. 投资规模与资金保障风险

大科学设施在成本估算阶段易出现系统性偏差。一方面,前沿技术本身成本难以精确预测;另一方面,在项目实施过程中往往会新增功能与性能需求,加剧预算的不确定性。长周期资金保障同样充满变数。例如,美国超导超级对撞机项目就曾因政治支持减弱与预算压力而在建设中被迫中止,造成近 20 亿美元的投资损失。宏观经济波动,如全球金融危机或区域经济衰退,也容易引发财政紧缩,使得大科学设施这类投入高、见效慢的项目最先受到预算削减的影响。此外,关键材料和设备的价格波动也会在长周期中不断累积,显著推高项目总成本。

2. 运行维护成本风险

建成是第一道难关,维护是第二道难关。建成后的大科学设施仍面临持续的运行维护压力。关键设备会随使用逐渐老化,技术也需要不断更新换代[30]。大科学设施的科学价值很大程度上通过用户服务来实现,然而扩大用户规模、提升服务质量都意味着更高的运行成本。

(四)政策与环境风险维度

1. 政策变动风险

政策的灵活性、针对性、快速性是其优势,也可能成为其劣势。国家科技战略与优先支持领域的调整,会直接影响大科学设施在政策体系中的地位与资源获取。特别是在重大国际事件或突发公共危机等背景下,科技政策可能迅速转向,给建设周期漫长的大科学设施造成高度不确定性。对尚在规划阶段的项目,政策变化可能导致立项决策反转;对已启动项目,则可能影响资源保障水平与实施进度。

2. 社会环境影响风险

大科学设施的持续建设需要公众理解、信任

和支持。而大科学设施通常投资体量大、见效周期长,其科学价值难以在短期内向公众清晰展示,因此在经济下行或财政紧张时期容易引发公众质疑。部分大科学设施涉及核技术、强磁场等高敏感技术,或在噪声、水资源消耗等方面可能对周边环境造成影响。在环保意识日益增强的背景下,此类争议带来的不满情绪可能影响项目进程,甚至导致选址变更或重新设计调整。大科学设施的选址与资源配置也常涉及区域间的利益平衡。不同地区为争取设施落地而展开恶性竞争。

3. 国际合作与地缘政治风险

在当前大国竞争加剧的国际环境下,科技合作受到更多审查与限制,部分大科学计划面临伙伴减少、投入下降等挑战。地缘政治风险具有系统性与不可控性,即便项目本身管理完善、技术先进,仍可能受外部环境冲击。多国参与的大科学项目还面临治理结构复杂、权责划分模糊以及利益分配争议等协调难题。合作中涉及的前沿技术与知识产权问题也极为敏感。部分关键技术可能受出口管制,合作产出的数据归属与专利权益分配若未在前期明确约定,极易在后期引发纠纷。

三、国际上主要国家大科学设施建设的模式总结

(一)美国:技术领先的冷战思维模式

美国作为全球大科学设施建设的先行者,其秉持着如果大科学设施的风险不可避免,则应努力使得收益超过风险,以保持在科技竞争中的绝对头部地位。

1. 确保自身科技领先地位

美国在大科学设施建设中的首要目标是在尽可能多的科技领域建立并保持其国际领先地位,依然保持着冷战时期的国际科技竞争逻辑。例如,在国际大科学合作中,美国会选择不参加自身不具备竞争优势的国际大科学合作项目,还会干扰甚至直接终结已经加入的多国共建类国际大科学合作项目。美国会集中国内资源与力量,重点选择并牵头组织其认为具有战略制高点意义的国际大科学合作项目[7]。

2. 联邦政府的主导作用

为因应管理过于分散的风险,在政治领域有分权传统的美国在大科学设施建设方面采用突出联邦政府主导作用的方式。美国的大科学设施的科技政策在第二次世界大战后历经了 3 次转向。冷战时期,美国大科学科研体系以国家安全为核心驱动力,“军—工—学”三者联动。1980 年以后,政策调整为通过技术创新驱动经济发展,重点解决联邦专利向民间授权问题。2017 年以来,美国的科技政策转向国家安全和保持技术领先为核心,通过政府干预实现技术保护[31]。美国联邦政府在大科学设施建设中发挥着主导作用。国家科学基金会(NSF)、能源部(DOE)、国防部(DOD)、国家航空航天局(NASA)等联邦机构根据各自职能分工,承担不同领域大科学设施的规划、投资和管理责任。联邦政府通过制定国家科技政策、设立专项资金、建立评估机制等方式,确保大科学设施建设与国家战略目标保持一致。

3. 主体功能互补

美国大科学设施建设充分调动了政府、大学、企业、非营利机构等多元主体的积极性,以缓解资源分散的困境。大学作为重要的科研力量,巩固了大学科学家与大科学建设之间的互动关系,使得追求学术自由与服务国家使命的价值并存、学术权威在国家科学制度中的合理嵌入、学术资本与行政能力的优势相耦合[32]。劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)、斯坦福大学的国家加速器实验室(SLAC)、麻省理工学院的等离子体科学与聚变中心(PSFC)等都是协同建设大科学设施的典型案例,搭建了技术研发、转让与利用在多主体之间的桥梁[31]。同时,企业界的深度参与是美国模式的突出特点。在资本逻辑下,波音、通用电气等大型企业不仅提供技术支持和设备制造服务,还参与设施的设计优化和运营管理,畅通了军用与民用之间的转化,实现了二者的互利共生,形成了功能互补、资源共享的网络化格局。

(二)欧盟:超国家合作模式

欧盟大科学设施建设模式充分体现了欧洲一体化的理念,为了对抗美国的科研领先地位和对科研人才的虹吸效应,其通过建立超国家的合作机制,实现了资源的优化配置和风险的有效分担。

1. 超国家合作的制度框架

与跨国合作不同的是,超国家的合作框架更加注重合作,将政策与环境风险消解于制度设计

之时。欧盟通过举办欧洲科研基础设施战略论坛(ESFRI)来制定欧洲科研基础设施发展路线图,统筹规划重大科学设施的布局和建设[33]。ESFRI 路线图每两年更新一次,为成员国提供科学设施建设的指导和参考,强化欧洲科研基础设施(RI)的战略研究[34]。在强调制度保持内在一致的同时给予成员国一定的灵活性。与大科学设施配套的是大科学研究资金,具有代表性的是欧盟的“地平线计划”。欧盟在大型研究资助计划的学科覆盖范围、持续时间和资助规模上与美国不相上下[35]。

2. 共建共治的管理模式

欧盟大科学设施采用“共建共治”的管理模式,即参与国家共同投资建设,共同参与治理,防止出现管理上的龃龉。欧洲核子研究中心(CERN)是这一模式的典型代表,也是至今国际大科学计划最为成功的典范。目前拥有 22 个成员国及 47 个准成员国、观察成员国或有合作协议的非成员国,设立理事会作为最高决策机构,各成员国按出资比例享有相应的决策权和使用权[36]。欧洲南方天文台(ESO)、欧洲同步辐射设施(ESRF)、欧洲 X 射线自由电子激光装置(European XFEL)等重大设施都采用了类似的治理结构。

3. 机制协同的运作体系

为有效统筹欧盟地区的科研创新资源和能力、优化研究政策战略和科技重点领域,促进欧洲研究机构体系的健康发展[37],欧洲议会于 2021 年 4 月提出《研究与创新框架计划》,认为要建立一个“欧洲研究区(ERA)”,以有效促进研究人员、科学知识和技术之间的协同和自由流通[38]。具体而言,大科学设施机制协同在欧盟表现为项目多元合作、中心机构主导、虚拟协同和知识群组 4 种模式[39]。机制协同还体现在人才培养和流动方面。欧盟通过玛丽·居里行动计划、伊拉斯谟计划等,为大科学设施建设和运营提供了充足的人才保障。

(三)日本:科技政策引导模式

日本大科学设施建设通过强有力的政策引导和紧密的产学研合作,实现了大科学设施的快速发展。

1. 科技政策的引导作用

日本内阁设立综合科学技术会议,由内阁总理大臣担任日本综合科学技术会议议长,负责制定国家科技发展战略、领导并协调各省厅的主要科研机构及科技项目[40]。通过“综合科学技术创新会议(CSTI)”统揽全局和横向串联的功能,科学引导大科学设施创新的发展方向[41]。文部科学省则作为主管部门负责具体实施,形成从顶层设计到部门落实的协调机制,防止政策的频繁变动。为支撑国家科研与社会发展战略,日本自 1996 年起每五年发布一轮《科学技术基本计划》,明确科技发展目标与大科学设施布局方向,形成稳定、连续、可操作的政策支持框架[42]。2023 年,日本发布的最新一批 12 个“学术研究大型计划”项目,强调以跨机构赋能人才培养、科学设定阶段目标及增进国际竞争力为价值理念[43]。政府通过设立专项资金、制定税收优惠政策等方式,引导企业和大学积极参与大科学设施建设。产业界凭借强大的制造能力和技术创新能力,为设施建设提供了高质量的设备和技术支持。

2. 京大模式到东大模式的转变

为了弥补政府科研实力不足的弊端,日本大力发展公共研究机构实力,积极引入企业研究所和大学研究机构,使其在日本科研体系中占有重要地位。

京都大学和东京大学的培养模式(分别简称“京大模式”“东大模式”)折射并代表了小科学时代的人才要求和大科学时代的人才要求在日本的演变,展现了日本如何顺应大科学设施成长的科学规律。京都大学起初在人才培养方面占据优势,其培养特点是自由放任,有利于具有强烈、明确兴趣驱动的天才学生。京大模式充分适应了小科学研究选拔顶尖科学家更看重个人天赋的需求。进入大科学时代,京大模式让位于东大模式,后者的培养模式是推迟专业化,在本科教育前两年,学生不分专业统一进入教养学部,实施系统完整的通识教育。在研究生教育阶段,东京大学也一反大多数日本大学讲座制的小专业化倾向,强调“知识构造化”[44]。东大模式逐渐成为大科学时代的培养主流,适应了大科学高度组织化、结构化、工程化、跨学科、跨机构合作的科研模式。

在大科学设施所涉领域,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[12]。

3. 有组织科研形式

日本研究型大学倡导有组织科研形式,日本文部科学省在《科学技术创新综合战略(2006)》及《科技基本计划(2006—2010)》的共同推动下,开始实施"世界顶级国际研究基地计划"(The World Premier International Research Center Initiative,简称WPI计划),以有组织科研的形式建立了一批主要由日本高水平研究型大学牵头的世界顶级研究基地[45]。在有组织科研形式下,日本大科学设施建设始终以技术创新为驱动力,注重原创性技术的开发和应用。SPring-8同步辐射设施、J-PARC质子加速器设施等都体现了日本在相关技术领域的领先优势。通过大科学设施建设,不仅推动了基础科学研究的发展,也带动了相关产业技术的升级换代。日本还注重大科学设施建设中的知识产权保护和技术转移,建立了完善的技术转移机制,促进科研成果向产业化应用转化。

四、大科学设施建设风险因应的中国路径

大科学设施代表了从"获取新知识"向"寻找新解决方案"的转变,激发了科学治理方式的创新[46]。因此,应紧密结合我国国情,提出大科学设施建设风险因应的中国之路。

(一)制度优势赋能的总体治理体系

对比美国、欧盟和日本的顶层设计能力,我国制度优势更加显著。党的集中统一领导为大科学设施风险治理提供了坚强政治保证与组织保障。特别是在应对技术不确定性、资源协调失衡、管理执行偏差等风险因素时,集中力量办大事的体制机制优势得以充分发挥,合力助推大科学设施关键核心技术突破,有效提升国家在科技重大工程中的系统应对能力。

在制度治理过程中,应不断加强全过程人民民主和法治体系的嵌入式功能。通过健全人大监督、政协协商、专家咨询等机制,推动科学决策、民主参与与社会监督的有机结合,保障大科学设施项目在技术路径选择、资源分配、风险管理等关键节点上的决策公开透明、科学合理。为大科学设施的风险治理提供稳定的法律依据与可预期的治理规则,进一步增强大科学设施建设的制度执行力与公众信任度。

(二)战略导向引领的风险前置机制

在战略牵引维度,应明确"大科学设施为了什么"。我国大科学设施的任务定位逐步向"三类战略使命"聚焦:一是服务国家安全,通过夯实高水平科学仪器支撑能力,强化在量子计算、先进材料、空间科学等领域的自主能力;二是回应国家重大需求,如支撑碳达峰碳中和、现代农业、重大疾病防控等领域的关键科学问题攻关;三是布局基础前沿研究,引领突破未来技术瓶颈。以任务需求为牵引的战略路径选择有助于提前预判可能面临的技术、资源、制度风险,并在布局阶段实现优化,从而提升设施系统在面对突发风险时的自我调节与应变能力。

在当前国际科技竞争加剧、科技"脱钩断链"风险上升的大背景下,强化关键核心技术的自主可控能力,已成为我国大科学设施建设的重要战略抓手。通过加快推进高性能探测器、超导加速器、先进控制系统等"卡脖子"技术的自主研发,逐步减少对外依赖,构建安全可控的技术体系,从而实质性降低供应链中断、技术外溢、制裁限制等外部风险对项目整体推进的冲击力。

(三)新型举国体制支撑的组织攻关机制

党的二十大报告中指出,"健全新型举国体制,强化国家战略科技力量,优化配置创新资源"[47]。新型举国体制强化大科学设施战略科技力量是后发国家克服市场失灵、系统失灵与制度失灵,从技术追赶迈向技术超越的必由之路。当前,依托国家实验室、综合性国家科学中心、国家重大科技专项等平台,逐步建立起科学家主导和专业管理双轨融合的治理机制。一方面,保障科研人员在目标设定与方案设计中的主导地位,强化学术判断力,赋予专家学者决策建议权;另一方面,引入具备复杂工程管理经验的专业人才和项目管理团队,提升整体执行效率与风险控制能力,促进科学目标与工程实施的深度耦合。

(四)数字化驱动的智能风控体系

传统风险管理方法依赖人工经验和概率模型,效率低、难以应对复杂和多维度的数据环境。人工智能、机器学习、文本挖掘等技术可以提高风

险识别和预测的效率与准确性。因此,可以构建数字化驱动的智能风控体系。

首先,可以开发数字化风险管理平台。应建立风险知识图谱来系统化风险因素间的关系。扩展数据来源的多样性和规模,包括大数据采集、跨项目数据库建设等,以提升风险识别与预测的有效性。

其次,实现跨平台集成。目前缺乏把数字孪生、BIM、云平台、IoT 等数字化管理工具与风险管理系统有机结合的研究,大多停留在单个平台应用。应通过标准化接口将各种管理系统嵌入统一平台,实现跨平台协同。在大科学设施的实时工程项目中验证这种集成模式的可行性。

最后,可以应用开发智能化决策系统。可探索数字孪生与虚拟仿真的结合方式,将其应用于决策阶段的前置性风险演练与干预。模拟运行过程中可能出现极端情境和潜在风险,从而能够提前发现耦合故障、资源瓶颈或接口不兼容等问题。在一些对精度或连续运行要求极高的大科学设施中,数字孪生还可以作为数字备份,当实体系统异常时,迅速切换至备用的控制或调度策略,保障整体决策系统的韧性。

(五)有序开放中的风险边界管理

作为科技大国,我国始终坚持在开放中发展、在合作中共赢,积极参与国际大科学工程,展现出高度的责任担当与合作意愿。然而,在当前国际格局深刻演变、科技“武器化”与“碎片化”加剧的背景下,开放合作所带来的技术外溢、安全泄露、成果归属模糊等风险日益凸显,急须构建一套有边界、有规则、有弹性的开放风控机制。

首先,应在制度层面建立以安全评估、出口管控、协议框架为核心的国际合作风险防范机制。学习欧盟基于军民两用的不同规制方法,在参与国际设施共建或数据共享前,建立项目级、机构级、国家级的安全审查程序,对合作对象的背景、技术敏感性、数据依赖性等进行多维评估,避免无底线开放带来的被动风险。同时,完善科技成果跨境转移管理机制,推进高技术出口分级分类监管制度,加强对涉及国家安全的核心技术出口管控。通过签署明确的知识产权协议、数据主权条款与成果使用边界等文件。

其次,科研产出采用复合评价。基于大科学设施产出的论文发表数量,是大科学设施最直接、最重要的效益。然而,论文发表数量是一种在几乎所有情形下都存在问题的衡量方式。即使这些过度简化的论文计数在某种程度上能够衡量科研质量,也不应当被作为支撑大科学设施运行合理性的唯一标准[2]。应走出“唯论文”的单一评价体系,建立多维度的评价指标体系,包括但不限于论文产出、专利产出、科研奖励、人才培养等,以期望全面反映大科学设施的科研贡献。论文产出指标要推行代表作制度和采用同行评审制度,防止利用大科学设施建造起来的设施壁垒进行科研“灌水”等[48]。专利产出指标应选择专利寿命与专利数量二维指标相结合,要统计基于大科学设施产生的专利申请和授权情况[49]。科研奖励指标要统计利用大科学设施取得的重大科研成果和获得的科技奖励,科研奖励不应以行政逻辑超越学术逻辑,量化奖励的目的是激励原创性成果的涌现。人才培养要注重依托大科学设施培养的科研人才数量和质量,瞄准拔尖创新人才的培养目标定位。

依托“一带一路”倡议、金砖科技合作与南南合作机制等战略框架,推进以风险共担、利益共享为原则的新型国际科技合作网络。通过共建实验平台、共同出资使用、共设人员岗位等方式,平衡参与方在风险与收益上的结构不对称,提升合作的制度黏性与长效性。同时,在面向发展中国家的合作中,也应注重能力建设与合规指导,避免合作演化为单向技术依赖或安全隐患的外溢。

五、总结和展望

大科学设施是科技基础能力、国家战略意志、科研组织模式与知识生产范式协同演化的制度结晶。风险治理作为大科学设施建设不可或缺的元变量,直接决定国家科技战略布局的韧性与可持续性。本文系统梳理大科学设施的技术原理、战略地位与多维风险类型,提出并构建了“技术—管理—资源—政策”四维动态风险治理框架,揭示了风险在设施全生命周期中呈现出递进式、系统性与嵌入性的演化特征,为理解与应对大科学设施的复杂性提供了理论基础与实践支撑。

进一步地,本文从我国制度特质出发,提出“制度优势—战略引领—组织攻关—智能风控—

边界治理”的中国风险因应路径,展现出中国特色新型举国体制在超大系统工程治理中的结构性张力与调节机制,回应了风险控制的技术理性诉求,也是后发国家在高不确定性前沿科技领域实现制度突破与技术超越的重要制度形态。

当前,全球科技格局剧烈变动、地缘政治风险持续上升、科学治理范式加速转型,单一维度、静态封闭的风险管理模式已难以适应大科学设施日益突出的系统耦合与开放协同特征。未来急须在以下几个方向上进一步深化研究:其一,加强跨学科风险建模方法的理论创新,融合系统工程、科学计量、组织管理与政策分析等多元知识体系,构建可演化、可预测的复杂系统风险分析工具,提升风险识别的精准性与前瞻性;其二,推进大科学设施风控治理体系的制度型建构,包括优化风险决策流程的法治化嵌入机制、建立重大科技基础设施风险信息披露制度、构建涵盖研发—建设—运行—退出全过程的责任链条与问责机制,实现从“事中应对”向“前置治理”转型;其三,构建具有全球互信基础的风险合作新机制,在“一带一路”、金砖机制等框架下推动形成以“风险共担、收益共创”为导向的国际科技合作协议范式,提升我国在全球大科学治理体系中的制度塑造力与议题引领力;其四,培育面向大科学设施的复合型治理人才体系,实现从技术专家、管理人员到战略科学家的系统协同与知识互补,推动大科学设施工程建设主导下实现知识创新和知识治理。

总之,大科学设施建设的风险治理问题,实质上是国家治理体系和治理能力现代化在科技战略前沿的制度演练场。未来对这一议题的研究,应持续坚持问题导向与理论自觉并举,在中国经验的基础上,推动构建具有自主性、开放性与国际影响力的大科学设施风险治理理论体系,以期为全球科学合作与制度创新提供中国范式。

参考文献:

[1]习近平. 加强基础研究 实现高水平科技自立自强[J]. 求是, 2023(15): 4-9.

[2] HALLONSTEN O. How expensive is big science? consequences of using simple publication counts in performance assessment of large scientific facilities[J]. Scientometrics, 2014, 100(2): 483-496.

[3]陈亮,邹洪森. 大科学时代大学多样化发展的价值演变、“小科学”困境与未来路径[J]. 西南大学学报(社会科学版),2025,51(3):227-239, 334.

[4]FLYVBJERG B, BESTER D W. The cost-benefit fallacy: why cost-benefit analysis is broken and how to fix it[J]. Journal of benefit-cost analysis, 2021, 12(3): 395-419.

[5]MERROW E W. Contract strategies for major projects: mastering the most difficult element of project management[M]. Hoboken: Wiley, 2022:1-25.

[6]MILLER R, LESSARD D. Understanding and managing risks in large engineering projects[J]. International journal of project management, 2001, 19(8): 437-443.

[7]林娴岚. 大国科技竞争与国际大科学合作的国家战略选择:基于中美案例比较分析[J]. 东北亚论坛,2024,33(3):33-46, 127.

[8]周燕,杜鹏辉. 大科学装置的建设运行、效应影响及经验启示:综述与评估[J]. 科技进步与对策,2024,41(12):151-160.

[9]邓泉,尹红星,韩效锋,等. 国家重大科技基础设施建设管理探索与创新:以聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)为例[J]. 科技管理研究,2023,43(6):190-195.

[10]黄振羽. 中国高校大科学装置治理困境与治理变革分析:基于“行政发包”视角[J]. 科学与社会,2021,11(1):44-60.

[11]李志遂,聂常虹,刘倚溪,等. 大科学装置(集群)驱动型创新生态系统的理论模型与实证研究[J]. 管理评论,2023,35(1):121-133.

[12]张毅,闫强. 大科学的技术创新范式及演化动力分析[J]. 中国软科学,2023(6):1-25.

[13]刘维宝. 大科学研究系统方法论的逻辑结构[J]. 科技管理研究,2020,40(19):237-242.

[14]王贻芳. 发展大科学设施,建设科技强国[J]. 求是,2025(5): 65-70.

[15]KOZHEUROV Y, TEIMUROV E. Megascience facilities in global research infrastructure[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1685(1): 012014.

[16]MATTHEWS B, SUFI S, FLANNERY D, et al. Using a core scientific metadata model in large-scale facilities[J]. International journal of digital curation, 2010, 5 (1): 106-118.

[17]TIMOFEJEVS A, AVOTINS V. The large-scale research facilities: the impact of increased utilization rate[J]. Space review, 2018, 5: 66-97.

[18]苏熹. 以国家科技发展战略目标为主导:中国国家实验室建设和发展历程述略[J]. 当代中国史研究,2020,27(6):87-101, 159.

[19]程晓舫,唐磊,夏依林. 大科学装置共建共享及其对区域一体化的影响:以长三角为例[J]. 科技管理研究,2020,40(22):26-31.

[20] SÖDERSTRÖM K R. Global reach, regional strength: spatial patterns of a big science facility[J]. Journal of the association for information science and technology, 2023, 74(9): 1140-1156.
[21]乔黎黎,韩小涛,刘中全. 基于重大科技基础设施建设迈向一流大学的路径分析:复杂产品系统动态能力演化视角[J]. 科技进步与对策,2021,38(23):10-19.
[22]陆颖. 柏林科研创新透视及其对上海的启示[J]. 科技管理研究,2021,41(18):32-39.
[23]武夷山. 面对大数据和人工智能,我谨慎乐观[J]. 世界科学,2017(8):1.
[24]樊建平. 蝴蝶模式:大科学时代科研范式的创新探索:基于中国科学院深圳先进技术研究院 15 年科学与产业融合发展的实践[J]. 中国科学院院刊,2022,37(5):708-716.
[25]张玲玲,付赛际,张秋柳,等. 以大科学装置为依托的高科技园区管控模式分析及对策建议:以中子科学城为例[J]. 科技进步与对策,2019,36(15):14-23.
[26] BOARD M I. Mars climate orbiter mishap investigation board phase I report, November 10, 1999[R/OL]. (1999-11-10)[2025-10-01]. https://www.dcs.gla.ac.uk/johnson/Mars/MCO_report.pdf.
[27]小林,李力,杨云,等. 欧盟大型研究基础设施路线图的经验及对中国大科学监测评估的启示[J]. 中国科技论坛,2020(1):181-188.
[28] QIN Y, RODERO I, PARASHAR M. Facilitating data discovery for large-scale science facilities using knowledge networks[C]//2021 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). Portland, Oregon, USA: IEEE, 2021: 651-660.
[29]李志遂,刘志成. 推动综合性国家科学中心建设增强国家战略科技力量[J]. 宏观经济管理,2020(4):51-57, 63.
[30]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.
[31]张东海. 二战后美国联邦科技政策的转向与研究型大学的崛起与发展:兼及对中国研究型大学发展的思考[J]. 华东师范大学学报(教育科学版),2025,43(8):118-128.
[32]夏之晨,杨帆. 大科学与大学科学家的角色:以斯坦福国家加速器实验室(SLAC)为例[J]. 华东师范大学学报(教育科学版),2025,43(8):105-117.
[33]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,2024,39(3):423-435.
[34]汪洋,周园春,王彦棡,等. 适度超前推动科研基础平台建设支撑我国高水平科技自立自强[J]. 中国科学院院刊,2022,37(5):652-660.
[35]李梅,阮文洁. 大科学时代全球科学家的国际流动:基于 Web of Science 期刊论文的分析[J]. 华东师范大学学报(教育科学版),2025,43(8):51-65.
[36]阎光才. 大科学的发展轨迹与科学组织的变革[J]. 华东师范大学学报(教育科学版),2025,43(8):1-15.
[37]冯江源. 大国强盛崛起与科技创新战略变革:世界科技强国与中国发展道路的时代经验论析[J]. 人民论坛·学术前沿,2016(16):6-37.
[38]余南平,冯峻锋. 新技术革命背景下的欧洲战略重塑:基于技术主权视角的分析[J]. 欧洲研究,2022,40(5):1-28,157.
[39]党倩娜. 欧盟地区协同创新模式、特点与启示[J]. 中国科技论坛,2015(10):149-154.
[40]董佳敏,刘人境,张光军. 大科学工程组织管理模式对比分析及对我国的启示[J]. 科技管理研究,2016,36(16):183-188.
[41]祝黄河,章晴. 中日科技现代化的比较研究及其启示[J]. 南昌大学学报(人文社会科学版),2024,55(3):12-21.
[42]李岩,穆荣平,李慧敏. 日本技术攻关"举国体制"历史演进及特征研究[J]. 科学学研究,2025,43(5):1102-1112.
[43]曲柳凝,石雪怡,杨颉. 迈向有组织的科研形态:日本"学术研究大型计划"的价值理念、运行机制与实践逻辑[J]. 清华大学教育研究,2024,45(6):62-71.
[44]汪辉,顾建民. 大科学范式下顶尖科技人才及其培养模式:基于 21 世纪日本诺贝尔奖井喷现象的分析[J]. 高等工程教育研究,2019(3):69-75.
[45]王思遥,黄亚婷. 日本研究型大学的有组织科研模式研究[J]. 苏州大学学报(教育科学版),2024,12(2):20-29.
[46] TIMOFEJEVS A, AVOTINS V. The large-scale research facilities: the impact of increased utilization rate[J]. Space review, 2018, 5: 66-97.
[47]习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[N]. 人民日报,2022-10-26(1).
[48]吴薇. "唯论文"现象的蔓延与破解之道[J]. 大学教育科学,2023(3):4-12.
[49]栾春娟,邓思铭. 专利质量动态监测二维指标模型构建与实证[J]. 科学学研究,2024,42(2):375-382.

(本文责编:润　泽)