

政策协调、不确定性与大型技术系统创新

——中国核电技术赶超的案例研究

陈 玲 孙 君 付宇航*

【摘要】 后发国家技术赶超需要实现“市场规模”和“技术自主”的双重目标，但现实中这一进程普遍面临技术依赖的“追赶者陷阱”的问题。论文采用个案内过程追踪的研究方法和“政策子系统”的分析视角，基于中国核电50年的技术赶超历程，解释了后发国家如何通过政策协调实现大型技术系统的技术赶超。研究发现，大型技术系统的创新绩效与其所在政策子系统的特性密切相关，核电政策子系统具有碎片化的结构和行为目标，需要同步进行政府部门间协调和政府对市场协调，协调机制主要包括国家意志、行政指令、共识信号和市场竞争等。政策协调通过降低大型技术系统中产业主体面临的供需不确定性，解决产业主体专用化投资不足的激励困境。跳出“追赶者陷阱”的关键在于建立国产化率目标硬约束与多种协调机制。研究进一步深化了对技术赶超中政府角色的认识，弥补了已有文献对于大型技术系统产业管理体制研究不足的理论缺口，对新型举国体制下提高系统创新能力有一定的启示。

【关键词】 政策协调 大型技术系统赶超 核电技术 政策子系统 新型举国体制

【中图分类号】 D63

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674 - 2486 (2024) 03 - 0001 - 23

* 通讯作者：陈玲（chenling@tsinghua.edu.cn），清华大学公共管理学院教授、博士生导师；孙君，清华大学公共管理学院博士研究生；付宇航，清华大学公共管理学院博士。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见。文责自负。

基金项目：国家社会科学基金重大项目“基于市场导向的创新体系中政府作用边界、机制与优化”（18ZDA115）。

一、引言

大型技术系统的技术赶超和创新是各国工业化进程的标杆。21 世纪以来，中国核电、高铁、盾构机、支线飞机、移动通信等大型技术系统具有令人印象深刻的创新绩效，而回溯历史，它们无一例外都有一段“以市场换技术”的曲折历程，甚至一度落入“引进——落后——再引进”的“追赶者陷阱”。这些以大型技术系统为依托的高技术产业的赶超史，同时伴随着政府体制和市场机制的转型，在世界产业技术发展史上蹚出了一条独特的中国道路，也为中国理论提供了丰富的实践基础。特别是中国的大型国有企业在技术赶超和创新中扮演了重要角色，而相关研究在西方主流文献中却鲜有中国理论的贡献。

西方文献对于国有企业创新的讨论多呈现消极印象，与私有企业相比，国有企业创新绩效不佳（World Bank, 1995），其原因可归于所有权结构、管理能力弱、权力垄断、补贴和优惠政策等（Kankaanpää et al., 2014）。但从历史实践来看，国有企业在后发国家的技术赶超中扮演了重要角色，尤其是在一些战略性新兴产业和大型技术系统中，国有企业已成为后发国家实现产业赶超和创新政策管理的一种有效工具（Tönurist, 2015）。以中国为例，以高铁为代表的国有企业主导的产业技术已位居世界前沿。对此，国内学界近年来多有理论建树，解释路径主要分为以下三种：一是从政府能力及政府干预视角，强调政府既是系统集成者也是用户，形成有控制的竞争市场结构（江鸿、吕铁，2019；吕铁、贺俊，2019），且政府的工业理解能力决定其能否制定有效的产业政策（封凯栋等，2021）；二是从企业能力的视角，提出工业技术学习与自主创新的能力是中国高铁技术进步之源，而技术能力的成长需要国家坚定的自主创新战略意志（路风，2019）；三是从工业管理结构的视角，分析体制、行为人和技术三者之间关系的动态演进，指出产业体制改革塑造行为人技术创新的激励结构，从而决定高铁的技术赶超绩效（黄阳华、吕铁，2020）。也有研究指出，中国国有企业之间基于“象征性优先权”的激励机制对技术创新具有显著影响（陈玲、付宇航，2022）。诚然，一个强有力的政府对于后发国家技术追赶至关重要，以上解释路径也都将政府视作高铁技术赶超的关键行为主体，但由于高铁政策子系统中政府部门的单一性，以上研究都在不同程度上忽视了碎片化的官僚体系与系统层次创新需求的矛盾，使得相关理论成果的普遍性受限。

本文基于对中国核电技术发展（1970—2021 年）的案例分析，从政策科学

视角构建了大型技术系统产业赶超的理论框架。本研究指出，大型技术系统产业赶超具有双重的政策目标，即自主技术能力与产业市场规模。事实上，“以市场换技术”这一提法本身就隐含了市场与技术的双重目标，只是策略性地暂时牺牲市场目标来优先实现技术目标，最终还是需要倚仗技术来夺回市场。研究发现，政策协调是影响大型技术系统赶超绩效的关键机制之一，如果想要使大型技术系统跳出反复引进的“追赶者陷阱”并实现赶超，就需要政府部门之间、政府对市场的同步协调。本文还进一步界定了国家意志、行政指令、共识信号和市场竞争等多种产业政策协调机制。这一案例研究不仅对后发国家的技术产业赶超有一定的借鉴价值，而且对我国以新型举国体制建设创新型国家具有现实意义。中国产业政策转型中由单一部门主管的“大一统”计划时代一去不复返，如何提高系统集成散布于多个重要产业主体的技术能力，并在碎片化的管理体系中推动系统创新，是新型举国体制亟须探索的命题。

本文以下的结构安排为：第二节引出本文的分析视角——政策子系统，分析中国核电政策子系统的特征，并论述本文的分析框架与研究方法；第三节呈现中国核电技术发展的纵向案例；第四节深入分析中国核电产业跳出“追赶者陷阱”背后国产化目标与政策协调机制的作用。第五节给出本文的结论与贡献。

二、核电产业的政策子系统视角

核电是典型的大型技术系统，即产业技术包含许多有区别但相互联系在一起的系统，在开发、建设和运营过程中涉及企业、政府、非政府组织等多主体（Hughes，1983），组成系统的各种技术和亚系统之间具有高度依赖性，需要很高的一体化知识和系统集成者的能力（路风，2019）。同为大型技术系统，核电与高铁在技术路径、决策结构与创新主体等方面有诸多相似之处。它们都经历了引进技术、再进行消化吸收再创新的历程，都伴随着强有力的政府干预和行政垄断，技术创新主体几乎都是国有企业或事业单位。然而，高铁只经历了一次大规模技术引进便走上自主创新的道路（路风，2019），核电却经历了三轮技术引进后才实现赶超。这种“引进——落后——再引进”的“追赶者陷阱”在半导体、汽车、大飞机等产业发展过程中都发生过，在后发国家中更是普遍（Cohen & Levinthal，1990；Lee，2021）。由此，本文将研究问题细分为两个前后相关的问题。其一，为什么中国核电在前两轮技术引进中陷入了“落后——引进——再落后——再引进”的“追赶者陷阱”？其二，为什么中国核电能在第

三轮引进中跳出“追赶者陷阱”，实现赶超？

为了回答上述问题，本文引入政策子系统作为分析视角。政策子系统（policy subsystems）是指特定公共政策议题的政策行为者集合，包括政府官员、利益集团、研究机构和大众媒体等（豪利特、拉米什，2006）。不同政策子系统的结构存在异质性，如高铁部门具有高度一体化的管理机构即铁道部，政策子系统的构成相对稳定，拥有一套共享的理念和政策体系；而核电则跨越了从姓“核”到姓“电”、从军工到能源的政策领域，具有相对复杂的政策子系统。核电与高铁在政策子系统上的差异，为理解其赶超效率差异提供了一个理论参照点。

（一）子系统的结构特征与行为目标

中国核电政策子系统包括“决策者－政府部门－产业主体”等三个层级的行为者。“决策者”是指由高层政治精英或协调小组组成的决策层，负责核电技术路线和产业规划等重大决策等（陈玲、薛澜，2010）。后两者是核电政策子系统的执行层，其中政府负责技术系统集成和项目审核，产业主体是指包括设计方、制造方和运营方在内的各个国有企业集团及其科研机构，主要负责具体的技术创新与生产经营（如图1所示）。

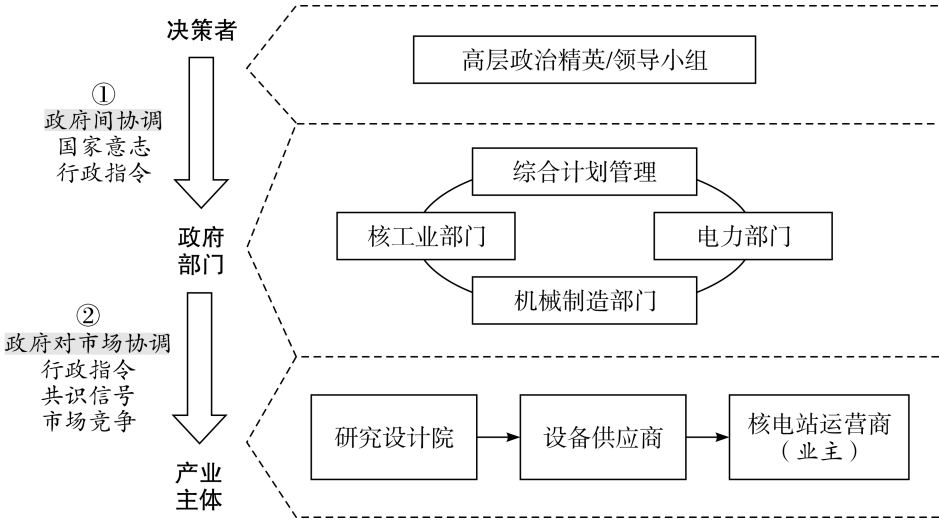


图1 核电政策子系统的构成主体及协调机制

注：图中产业主体仅包含了核电产业中最核心的设计方、制造方、运营方三方主体，工程建设商、核燃料供应商和技术服务商等主体因不是影响技术赶超的核心主体，所以图中未呈现。

资料来源：作者自制。

核电的政策子系统具有碎片化的结构特征，导致各主体缺乏共享的政策理念和行为目标，具体表现为两个方面。

一方面，核电政策子系统中存在多个并行的行业管理部门，缺乏共享的政策理念。核电的政府主管部门从1970年核电技术起步至今历经多次变迁，有时同时拥有核工业部门、能源部门、机械制造部门等主管部门。这些部门在政策理念和目标上存在显著差异，部门间博弈更为常见，政策共识更难达成（温庭筠、余娜，2016）。因此中央决策层在进行核电决策时，同时要协调多个主管部门及其相应政策，协调问题尤为突出（陈玲、薛澜，2010）。

另一方面，核电政策子系统中产业主体分属不同的市场，产业链一体化程度不高。核心产业主体——设计方、制造方、运营方分别对应大型技术系统的开发设计、设备制造、工程建设和运行管理，三方的协作程度是影响大型技术系统创新的重要因素（林宗棠，2013），核电产业链中，设计方和运营方联系紧密，大多数设计单位隶属于中国三大核电业主集团——中国核工业集团公司（以下简称“中核集团”）、中国广核集团有限公司（以下简称“中广核集团”）、国家核电技术有限公司（以下简称“国家核电”）。但是核电设备制造方如中国第一重型机械集团公司（以下简称“中国一重”）、中国第二重型机械集团公司（以下简称“中国二重”）、中国东方电气集团有限公司（以下简称“东方电气”）等大型装备制造集团则属于外部供货商，其汽轮机等重型设备的市场也同时面向核电产业以外的其他产业。设备制造和设备的设计与使用相对分离，从而使得产业链上中下游之间的协调问题尤为突出。21世纪以来，新的业主集团加入核电领域，如中国电力投资集团公司，这些企业则隶属于传统电力部门。

以上三方产业主体具有不同的行为目标。其中，三个业主集团均为中央国有企业，具有使命导向型的行为目标，重视来自国家战略的创新任务；设备供应商则包括地方国企、上市公司、民企等，其行为模式受市场竞争影响更显著，技术创新是以市场为导向的技术能力积累过程。

（二）子系统内的政策协调

几乎每个政策子系统都会面临政策协调问题（Pollitt，2003；Peters，2015）。政策协调是指在不消除组织边界的基础上，通过自愿或强制性的协调机制促使政策子系统中目标和利益各异的政策行为者达到目标或行为的一致（Lindblom，1965；Molenveld et al.，2020）。中国创新体系由于体制转型存在碎片化管理与主要创新主体的组织失配问题，迫切需要政策协调（Kroll & Schiller，2010）。

在后发国家赶超型产业政策中，常见的政策协调机制包括以下四点。（1）国家意志，即国家最高决策层关于产业发展的政治战略，比如中国在 2006 年提出自主创新战略促使中国高铁从技术引进走向自主研发（路风，2019）。（2）行政指令，即基于层级官僚体系的协调，包括行政命令、规则和程序，以及组织结构的调整。比如中国铁路机车产业和汽车产业通过加强主管部门权力或者设立新的协调机构提升产业管理机构的延续性与职能整合程度（Christensen & Læg Reid, 2007；封凯栋等，2021）。（3）市场竞争及价格机制等，竞争压力可以迫使企业家把资源配置到技术创新活动上（Aghion et al. , 2015）。（4）共识信号，包括产业规划、行业协会等，传递有关产业发展的信号（Sergey & Breidne, 2007），增进不同主体之间的共同信念和共有知识，促进彼此信任和相互依赖。

根据协调目标主体的差异，核电政策子系统内政策协调主要包括政府部门间的协调和政府市场的协调（如图 1 所示）。政府部门间的协调主要通过国家意志和行政指令来实现，政府对市场的协调则混合使用了市场竞争、共识信号、行政指令等多种协调机制来实现。

（三）政策协调的作用机制：降低不确定性

在大型技术系统中，政策协调主要通过降低产业主体面临的不确定性来影响技术赶超绩效。

产业主体面临的不确定性分布在如下几个层次。首先是宏观层面来自国家战略和政治意志的战略不确定性；其次是来自政府部门和政策执行的政策不确定性；最后是市场不确定性，包括来自市场供需双方的供应不确定性和需求不确定性，前者指供应方出现供应产品的质量不合格、供应中断、超过交货期等问题，后者表现在用户或企业之间的欺骗与背叛行为（Arshinder et al. , 2011）。事实上，战略不确定性和政策不确定性通过影响市场主体的技术选择和投资决策，进而影响到市场不确定性。

核电产业遵循“订单式研发生产”的模式，过高的市场不确定性会导致产业主体缺乏进行专用性技术研发的积极性。核电产品作为技术密集型、单件或小批量生产、用户定制的大型产品或系统（Hobday et al. , 2005），其产业技术创新的过程是资本密集、反复试错的试验过程，对实践性知识和科学知识的要求都很高，给公司的财务和知识资源造成巨大负担（Shen et al. , 2019）。因此，企业无法承担“先研发产品、后开拓市场”的风险，而是遵循“订单式研发生产”——接到来自客户的定制需求后再进行研发，于“在干中学，在学中干”

的过程中提高技术能力（Arrow，1971）。生产者和使用者之间的大量互动可以减低技术创新的不确定性，提高投资回报率（Lundvall，1992）。

核电政策子系统的结构特征、行为目标和政策协调对于解释核电技术赶超极为重要。对政府部门来说，国家意志是克服部门本位主义、达成政策共识的关键。对产业主体来说，需要服从政府使命导向的产业政策目标和市场导向的发展需求。如何有效协调政府部门和产业主体的利益关系，减少创新中的不确定性，是大型技术系统赶超成败的关键。

（四）研究方法与资料来源

本文采用的研究方法是个案内的过程追踪。核电案例是研究后发国家大型技术系统赶超的典型示例。本文深入自1970年以来中国核电技术发展的历史情境中，对技术动态演变发生背后的因果机制进行解释。相比其他研究方法，过程追踪作为一种建立因果机制的方法，同时具备理论检验与理论构建的功能，适合解释包括诸多因素的长历史案例（George & Bennett，2005）。与纯粹的历史研究相比，过程追踪研究强调对于历史过程维度与理论变量维度的平衡，更加强调微观层面的理论建构与检验。

本研究资料来源分为三类，一是公开的历史档案资料、政策文件、关键人物访谈等经过公共舆论审视的资料，二是核电业界专家和政府官员的访谈，三是访谈对象提供的内部文件与资料。本文参考的资料不仅从时间维度上覆盖了1970年至2021年中国核电产业发展的全阶段，尤其是促使阶段更迭的关键历史时刻，亦从主体维度上覆盖了中国核电主要决策者、政府部门和产业主体的重要亲历者在以往历史时刻的即时记录以及事后总结与反思，证据可靠性较高。在涉及重要决策或历史数据（如国产化率）等事实问题时，作者采用多种来源的资料交叉验证的方式以提高案例研究的效度。

三、案例分析

中国核电在1970年起步，至今经历了从计划经济到社会主义市场经济的体制转型。本研究按照中国核电产业制度变迁与技术赶超的历程，将核电技术发展分为三个阶段。1970年至1985年是技术起步期；1986年至2002年是引进学习期，对应我国核电产业“引进——落后——再引进”的发展阶段；2003年至今是全面赶超期，对应我国核电产业跳出“追赶者陷阱”的赶超阶段。

（一）技术起步期：政府间协调，核电姓“核”姓“电”之争

核电在中国诞生之初就面临着姓“核”还是姓“电”、“自力更生”还是“引进技术”的双重争论，集中反映了该阶段政府部门之间的协调困境。1970年，时任国务院总理周恩来曾先后三次提出建设核电站（姚文君等，2013）。1974年，中央专门委员会会议正式批准了30万千瓦压水堆核电站方案，命名为“728工程”，即秦山核电站的原型。1978年，国务院批准了从法国引进两套90万千瓦机组的核电站，即大亚湾核电站的原型。此时爆发了一场中国核电的发展应该自力更生还是引进技术的大争论。当时，水利电力部是核电的主管部门，掌握审批权和投资资金，第一机械工业部是大型设备制造的主管部门，第二机械工业部是动力堆和核燃料的提供者，具备核技术和人才优势。第一机械工业部、水利电力部、国家基本建设委员会主张“728工程”下马，国防部国防科学技术委员会、第二机械工业部、国家计划委员会（以下简称“国家计委”）却坚持推进，不同部门的目标和立场迥异，相持不下，时任国务院副总理谷牧出面协调无果，由此“728工程”暂时搁置（姚文君等，2013）。

1982年，第二机械工业部改名为核工业部，各部委之间关于核电主管权和技术路线的矛盾再次凸显。1983年1月，国家计委主持召开核电技术政策论证会，业内称之为“回龙观会议”。会上，各部委之间爆发了有关核电技术发展路线的冲突，但最后还是形成了《核能发展技术政策要点》，在核电技术路线和发展途径方面暂时形成共识。同年，中国成立国务院核电领导小组以协调各部委之间的矛盾，并发文明确各部委核电产业的分工范围，即由水利电力部管核电站总的建设和运行，并负责常规岛建设；核工业部负责核岛建设和工艺系统初步设计；机械工业部承担核电站设备设计和制造，负责成套供货（刘堂炜等，2013）。但对于不同的核电站，各部委之间的分工又不同，秦山核电站从设计、设备研制到建设的整个过程由核工业部为主进行，而广东核电站、华东核电站等则由水利电力部为主进行（李鹏，2004）。

由此，中国核电产业在这一时期多个政府主管部门并存，形成职能交叉和部门竞争，加大了产业系统内创新主体面临的需求和供应的不确定性。两条技术路线都面临研发停滞的困境，也塑造了下一个阶段更为碎片化的技术引进模式（如图2所示，1970—1985年阶段）。

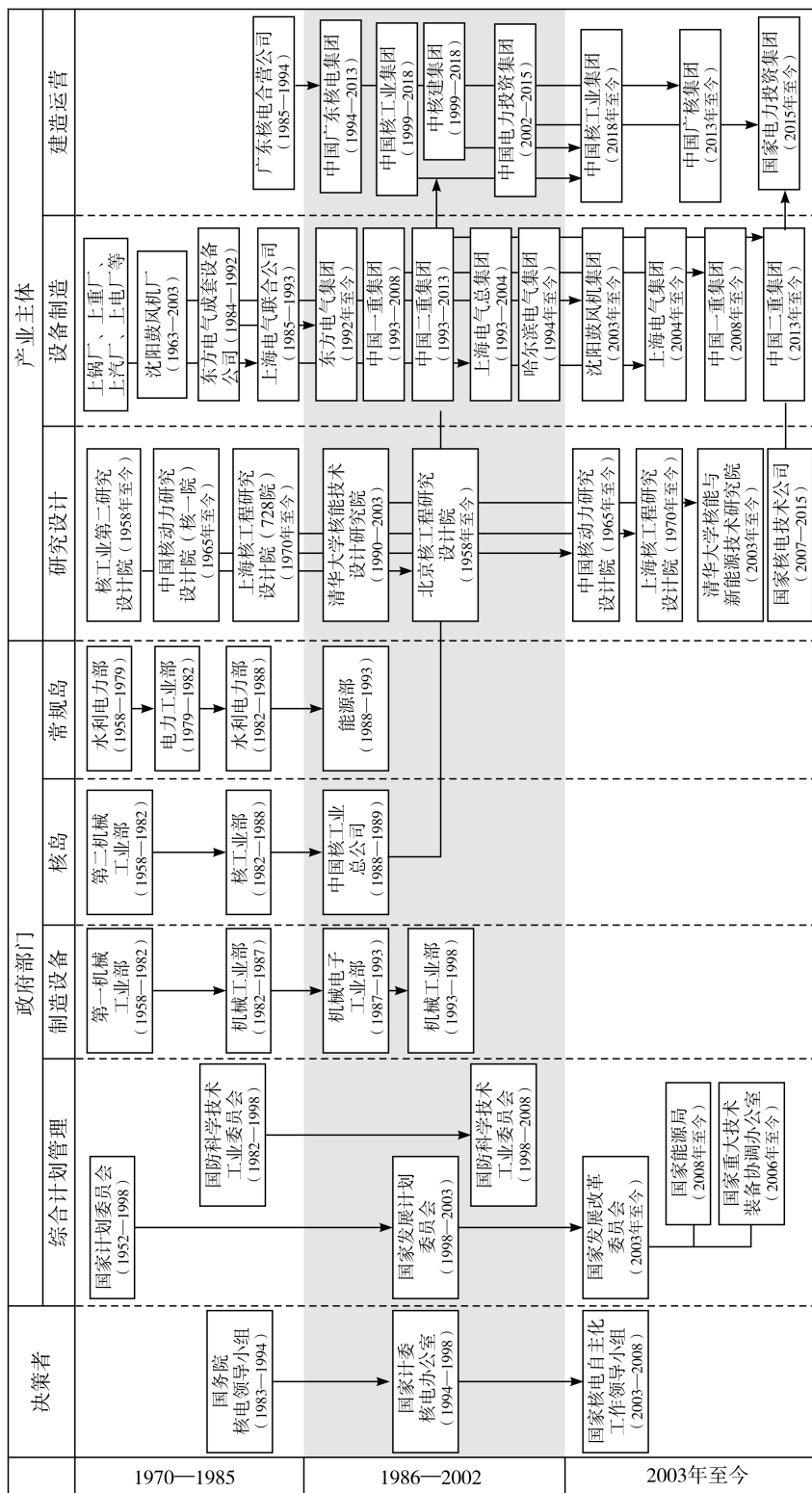


图2 中国核电政策子系统的决策结构与创新主体演变

注：由于图片尺寸所限，图中部分机构使用简称，其中部分机构名称正文中有明确标示，其余简称与官方全称分别为：上锅厂（上海锅炉厂）、上重厂（上海重型机器厂）、上汽厂（上海汽轮机厂）、上电厂（上海电机厂）、上电厂（上海电机厂）、中核建集团（中国核工业建设集团有限公司）。

资料来源：作者自制。

在自力更生的技术路线中，政策协调失灵加大了产业主体创新中的不确定性，导致产业技术能力无法集成。秦山一期工程是中国第一次自主设计核电站，核电站的整体设计全部由国内完成，以上海核工程研究设计院（曾用名“728院”）为主导，其他研究院部分参与。但是碎片化的管理体系使得设计与制造、工程难以衔接，比如1998年发现反应堆堆内构件堆芯下部支撑结构设备的设计制造无法满足设计原理的功能要求（赵志德、何宏龙，2007）。随着“728工程”的暂缓与重新上马，分配给指定主体的制造任务也多次变更，从而加大了创新主体面临的需求不确定性。比如20世纪70年代初，上海汽轮机厂（以下简称“上汽厂”）在接到“728工程”的310 MW核电汽轮机的设计和制造任务后进行了6年的攻关，该工程暂停后，与之相配套的核电汽轮机也随之停止投料生产。20世纪80年代“728工程”再次重启时，上汽厂多次向有关部委汇报，才说服有关部委放弃成套进口核电汽轮机，继续由上汽厂承担设计和制造任务（忻惠发等，2013）。

在技术引进的路线中，政策协调失灵导致“技贸合作”的模式破产，降低了前期技术投资的回报率。1977年，“728工程”300 MW核电机组还在筹建之时，中国就已开始谋划1000 MW核电机组的发展。有关部门通过与外国公司的多方接触、谈判，最后选择引进2台1000 MW级核电机组，1978年、1979年分别完成技术与商务谈判，但“主张自力更生、自主建设核电站的呼声很高，当时未能签约，随即便取消了这一计划”（刘堂炜等，2013：155）。大亚湾核电项目也在部门博弈、路线之争的反复中偏离了技贸结合的初衷，走向技贸脱钩。1983年的回龙观会议确定了技术引进以法国为主，技贸结合逐步国产化的路线，但在1986年国务院决定核电由水利电力部改为核工业部主管后，中国与法国法玛通公司的技贸结合的核电技术引进谈判终止（刘堂炜等，2013；汤紫德，2007）。政府部门协调失灵更加大了产业主体所承担的不确定性风险，“根据企业普遍反映，单位自有资金数量不多，难于以自筹资金方式来承担任务，项目涉及面广、投资大、周期长、占用流动资金多，投资经济效益不显著。”（刘堂炜等，2013：164）在此时期，研发机构的研发任务搁置，前期研发成果未取得相应回报。

总结这一阶段来看，国家意志的摇摆导致政府部门之间的协调失灵，加大了产业主体所面临的供需不确定性，降低了其技术投资的积极性与研发能力，不论是自力更生还是技术引进都进展缓慢且时有停滞。中国1958年首次提出研究核能发电，起步并不比法国、日本、韩国晚，而上述三国通过采取技贸结合、消化吸收再创新的政策，很快成为世界核电制造强国，但中国却由于政策协调失灵错失技术发展机遇。中国1970年提出第一座核电站秦山核电站的方案，到

1984 年才正式开工，1991 年并网发电，虽然建设之初计划核电设备国产化率达到 80%，但实际只实现 40% 左右（张国宝，2015）。

（二）引进学习期：协调产业主体，尝试业主负责制

这一阶段，政府部门层面的协调被多次机构改革中断和消解，决策者在市场化改革中推行业主负责制来协调产业主体层面的技术集成。结果表明，市场机制在协调产业主体的系统集成方面初见成效，却降低了大型技术系统的自主技术能力和国产化率。

1. 政府间协调：多次机构改革导致协调失灵

1986 年是中国核电产业发展的重要转折点。在国防工业“军转民”的大背景下，国务院提议核电主管部门由能源电力口转到军工口，此后核电主管部门经历数次变更（李鹏，2004）。第一次是在 1988 年，国务院机构改革裁撤核工业部，组建能源部，同年组建了中国核工业总公司。核工业总公司虽归能源部管理，但与能源部平级，而能源项目的审批权又在国家计委，因此能源部虽为核电主管部门，却作用有限。第二次是在 1993 年 3 月，国务院由于“关系不顺、调解手段的不足”裁撤能源部，组建电力工业部和煤炭工业部，同时给予中国核工业总公司“国家原子能机构”的名称（黄毅诚，2013）。1994 年，国务院核电领导小组裁撤，协调工作改由国家计委承担，更名为国家计委核电办公室。第三次是在 1998 年，为消除政企不分的组织基础，国务院裁撤了几乎所有的工业专门经济部门，中国核工业总公司所承担的政府职能一部分划归新组建的国防科学技术工业委员会（徐玉明，1999），另一部分则与国家计委核电办公室一同划归国家发展计划委员会基础产业司，后者负责主管核电设备国产化工作。本阶段频繁的主管部门变换和企业重组，导致中国核电工业迟迟未形成一个长期发展规划。

与第一阶段类似，政府部门间协调失灵导致自力更生和引进技术的两条技术路线都反复更张，使中国核电发展进程滞后。就自力更生的技术路线而言，由于缺乏国家意志和行政指令等协调机制确保国产化方案的实施，我国自主研发的二代核电技术方案迟迟不能落地，企业专用技术投资得不到回报。我国早在 1996 年底就开始自主研发百万千瓦核电技术，在此之前国内最先进的是大亚湾核电站使用的法国百万千瓦级核电机组 M310 及其 157 组燃料组件，称之为“157 堆芯”。中国核动力研究设计院（以下简称“核动力院”）在消化吸收了 M310 的设计技术后，经过多次研发，于 1997 年形成自主的百万千瓦核电技术——以“177 堆芯”为核心设计的 CNP1000 技术方案，并将该技术方案推荐给中广核集团的岭澳二期工程。但中广核以技术不成熟为由拒绝，依旧选择基

于 M310 技术开展设计,这是中国自主设计的 CNP1000 错失的第一次落地机会(中国核动力研究设计院,2021)。核动力院在秦山二期及其扩建工程核电站设计时把 M310 的 157 组堆芯改为 121 组堆芯,功率降为 65 万千瓦(中国核动力研究设计院,2021)。由于技术路线的摇摆不定,秦山二期核电站从 1987 年立项到 1996 年开工,历时 8 年,其间反复论证,至 2002 年才建成投产。由于当时国内秦山一期核电机组运行后一直没有启动后续核电项目,所以中国一重、中国二重等到日本所学的核电大型铸锻件技术没有得到实际应用,几年后技术人员的工作几经变动导致该类专有技术荒废(汪福全等,2013)。技术引进的路线也颇为波折,在此期间中国从国外引进了岭澳一期、秦山三期、田湾一期三个核电项目,全部采用“国外总包”形式,其中秦山三期、田湾一期两个项目是“交钥匙”工程,即全程由外方设计、建造、采购设备、安装调试,走上一条多国采购、多种机型、多国标准、多种技术混用的反复引进的道路(陈玲、薛澜,2010)。

2. 政府对市场协调:业主负责系统集成

这一阶段的新变化出现在产业主体层面的协调机制。由于此阶段中国正处于由计划经济体制向市场经济的过渡期,核电产业的管理与建设也面临改革,产业链上出现了一大批市场主体(如图 2 所示,1986—2002 年阶段)。当时秦山核电站二期工程被首先列入固定资产投资体制国家改革试点的重点项目,市场化运作程度较秦山一期有了明显提高,实行了“业主(法人)负责制、招投(议)标制和工程监理制”的新型管理模式,工程发包采用大包与小包相结合的模式,国家重要核电设备由国家定点,设备采购由业主负责,实行“多国采购、择优定点”。

引入市场竞争和管理机制影响了产业内不确定性分布,有效调动了业主去协调其他产业主体。事实证明,不确定性的承担者只要有足够的自主权和预期回报,就有动力去主动协调其他主体。首先,对运营方而言,业主负责制下业主在获得部分设备采购权的同时也承担了供应的不确定性,因此有动力去推动设计方和制造方的深度交流与融合以提高供应质量。一位负责协调核电设备国产化的受访官员称:“关键核级设备试验验证的平台投资极大,单个企业利用率低,只有业主联合研发机构才能解决试验平台的问题。”当时的秦山核电联营公司(以下简称“秦山核电”)作为业主起到了沟通设计方和制造方的重要角色。对外,秦山核电分别与法国和美国的相关公司签订设计咨询合同和合作总协议,引进了上百个设计分析软件,收集了整套参考电站的图纸资料 and 标准规范,并建立了多种试验台架,进行了大量的科研试验(温鸿钧、余娜,2016);对内,秦山核电向国内设计院提供现场设计基础资料和其他核电站的参考资料,并积极协助设计院和有关设备制造厂开展科研攻关,为设备选型和定点做准备。此

外，为了保证设备质量，秦山核电编写了一系列管理程序，将整个采购过程纳入有序管理。最终，秦山核电通过秦山二期核电站项目创立了中国第一个具有自主知识产权的商用核电品牌——CNP650，秦山二期核电站的比投资亦为国内建成的核电站最低（唐洪驹、朱兴梓，2013）。其次，对于供应商而言，招投（议）标制的实行降低了行业准入门槛，引入竞争，吸引制造集团主动入场，提高了技术改进的激励。如1995年岭澳核电站在设备供应合同中，实行“国外总包、国内分包”，当时东方电气主动向法国法玛通公司争取承担分包制造协议，同时与核动力院、中国二重等组成集设计、原材料、制造于一体的产业联盟。最终，东方电气仅用了10个月就取得了国内民用核承压设备制造资格许可证，并获取了设备分包合同，目前已成长为三代核电装备主要供应商（唐洪驹、朱兴梓，2013）。

然而，仅靠市场协调机制会带来过高的市场不确定性，不利于实现“自主技术能力”的政策目标。业主负责制实质是将核电设备国产化的研发、制造、资金支持等的不确定性集中于业主上，但仅凭业主一方难以协调核电政策子系统中的其他产业主体。秦山二期项目实行时，业主项目管理的首要难题是“处理好传统的行政管理与现代企业管理体制两者间的关系”，提升国有企业合作执行的有效性与严肃性（李永江，2017：73）。国内设备厂家的供应难题也缘于长期专用性技术投资不足。一位负责协调核电设备国产化的受访官员称：“在近十年多堆型、多技术路线的背景下，一个设备企业往往面临多个同时进行的项目，按期、保质保量是主要矛盾。”因此，业主承担了诸如质量不合格、超过交货期等供应不确定性风险。在秦山二期核电站建设过程中，2号机组汽轮机和发电机制造实际拖期7个月，压力容器的制造严重拖期26个月并存在缺陷，业主因局部返修承担了5000余万元的直接经济损失，建造进度再次拖后6个月（李永江，2017）。而国产设备研制的费用与风险增加了业主投资控制的压力。“一些新研制的国产设备和材料，不仅需业主承担研制费用，还要承担新设备、新材料在工程应用中的质量和进度控制上的风险，其价格往往高于国外进口材料。”（李永江，2017：76）由于当时决策层还在自主或引进两条技术路线摇摆，国产化率仅是引导性指标，缺乏确保国产化率实现的国家意志和行政指令等协调机制，结果是业主妥协和让步，以至于项目后期设备国产化的比例从原定的70%下降到50%左右（李永江，2017）。

总结来看，第二阶段通过业主负责制、招投标等市场机制，促使业主有足够的自主权和激励去促进产业主体间加强合作，最终实现了秦山二期工程的建设成功，证明此阶段中国核电产业具备了系统集成能力。但由于政府部门间协调矛盾仍未解决，缺乏自主创新的国家意志和行政指令，此阶段仅实现了中国

核电市场规模的扩展，却未达到核电国产化率的预期目标。

（三）全面赶超期：同步协调政府部门和产业主体

第三阶段吸取了前期的经验和教训，确立了自主创新的国家意志，并通过行政指令、共识信号、市场竞争等多种协调机制同步协调政府部门和市场主体，解决政府部门本位主义和产业主体自主研发专用性投资不足的激励困境，中国终于在三代核电技术上实现赶超。

1. 政府间协调：自主创新战略形成国家意志和政策共识

首先，政府部门层面的协调困境在国家自主创新战略下得以解决。自主创新战略明确了核电技术的主管部门、技术路线选择和发展规划，大大降低了产业主体在战略选择上的不确定性。2003 年是中国产业政策的拐点（Chen & Naughton, 2016），自主创新成为该阶段的国家意志与指导方针。新的中央决策层对核电政策子系统进行了一系列调整，包括在 2003 年国务院成立国家核电自主化工作领导小组作为中央协调机构，在 2006 年国家发展和改革委员会（以下简称“国家发展改革委”）成立重大技术装备协调办公室，负责协调重大技术装备规划和相关政策推进技术装备国产化，以及在 2008 年成立国家能源局，主管核电业务。

其次，自主创新战略和核电政策规划作为共识信号，引导政府和市场形成核电实现技术自主与市场规模双重目标的共同信念。2006 年 1 月，时任中共中央总书记胡锦涛在全国科技大会上提出要建设“创新型国家”；随后，国务院发文明确把发展百万千瓦级核电机组列为 16 项关键领域重大技术装备和产品之一，并在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》中提出“实施促进自主创新的政府采购”。2007 年，国家发展改革委牵头编制的《核电中长期发展规划（2005—2020）》发布，提出核电占全国电力装机总容量 4% 的目标。实现三代核电的设计自主化与设备国产化是此阶段的共识目标，并明确了未来核电市场的需求规模，大大降低了市场的供需不确定性。

2. 政府对市场协调：市场规模与竞争解决激励困境

技术集成的主要协调矛盾由政府部门转向产业主体，包括设计运用企业（业主）和制造企业。其中，业主企业的技术协调最为困难。2006 年中央决定全面引进第三代核电技术 AP1000，并正式成立国家核电技术有限公司，作为 AP1000 技术的主要引进者和消化吸收载体。中国核电产业呈现出中核集团、中广核集团、国家核电三大业主集团并立的发展格局（如图 2 所示，2003 年至今）。三大业主集团都具备独立研发能力，形成了中国三条技术路线并存且相互竞争的局面（如图 3 所示）。

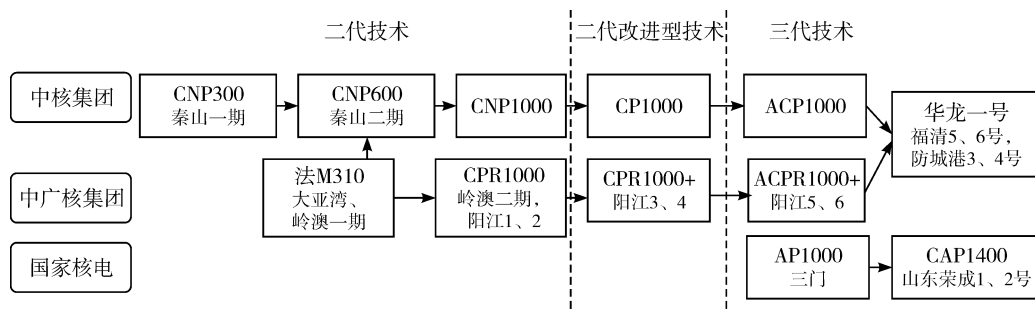


图3 中国核电技术发展路线

资料来源：作者自制。

中国最终形成具有完全自主知识产权的“华龙一号”，标志着自主创新和产业赶超的成功。“华龙一号”核心技术源自中核集团下属核动力院的ACP1000。如前文所述，核动力院在1997年就形成以“177堆芯”为核心设计的CNP1000技术方案，但该方案多次错失落地机会。2003年，中核集团组织核动力院与上海核工程研究设计院合作开展CNP1000核电机组的初步设计工作，但由于两院参照的核电技术方案标准体系不同且未形成共识，从而导致厂址设计未能让政府部门和业主接受，CNP1000也错失落地机会（中国核动力研究设计院，2021）。2010年，由CNP1000升级的CP1000通过了国内专家和核能行业协会评审。CP1000技术研发的成功解决了中国自主100万千瓦核电技术从无到有的问题，正待落地，但由于2011年3月的福岛核事故，CP1000的落地再次停滞。2012年10月中央决策层才对核电项目放行，国务院常务会议讨论通过了《核电安全规划（2011—2020年）》和《核电中长期发展规划（2011—2020年）》，规定“新建核电机组必须符合三代安全标准”。中央决策层的规划释放了积极信号，使得中国核电建设前景有了稳定预期，激励了中核集团和核动力院按照第三代安全标准继续升级CP1000技术。中核集团专门下达了重点科技专项“ACP1000三代核电技术”研究任务书，由核动力院和核工业第二研究设计院共同完成。此时AP1000引进消化吸收工作与示范工程也在同步进行，中核集团及核动力院感知到国内核电市场竞争激烈程度空前，中国核电建设或将统一技术、以AP1000为主，留给ACP1000的时间窗口非常紧张（中国核动力研究设计院，2021）。

国家战略和市场竞争倒逼中核集团和核动力院加大了技术投资。中核集团将核电运营收益拿出一部分投入科研，加快ACP1000的研究进度，并定下了2013年具备开工建设条件的目标（中国核动力研究设计院，2021）。核动力院则重构管理架构，将三级管理体系“院本级—研究所—专业科室”变成了矩阵型的院级管理项目部，即ACP1000项目部，这也是核动力院史上第一个以型号

为目标设立的、组织架构完整的核电项目部，各级项目管理符合“华龙一号”整体研发战略，形成高效协同，提升了研发过程中产品和技术的深度融合（中国核动力研究设计院，2021）。

另外两条技术路线，即中广核集团的 ACPR1000 + 和国核的 AP1000 也受到国家战略和市场竞争的双重压力。中广核集团在消化、吸收 M310 的基础上，形成百万千瓦级压水堆核电机型 CPR1000 + （如图 3 所示）。国家核电引进的 AP1000 三代技术并非是成熟技术，其主泵和爆破阀供应拖期，法国 EPR 压力容器出现质量问题，为另两条技术路线留下了市场空间。三条技术路线竞争中，由中核集团和中广核集团主导的三代核电技术后来居上。2013 年国家能源局提出将中核 ACP1000 和中广核 ACPR1000 + 进行融合，形成“华龙一号”（张慧，2014）。随后中核集团和中广核集团按照融合后的“华龙一号”总体技术方案完成初步设计，2014 年 11 月和 2015 年 4 月国家能源局和国务院常务会议分别正式批复同意福清 5 号、6 号机组采用“华龙一号”技术方案，“华龙一号”终于实现了从研发到落地的全过程。

制造企业的协调困境在此阶段也得以解决。通过核电国产化率指标硬约束和政策规划中市场规模扩大的信号，制造企业面临的市场不确定性下降，增大了专用性技术投资。首先，国产化率指标是此阶段政策协调的关键强制性工具。AP1000 技术的引进是以实现三代核电设备国产化为目的的，在引进 12 项关键设备材料的设计和制造技术时，政府部门在产业主体层面上进行了细致和统一的分工协调，并详细规划了国产化率实现步骤。2007 年国家发展改革委重大技术装备协调办公室组织 12 家国内核电和机械制造集团共同形成 AP1000 核电关键设备自主化工作方案，并在方案中明确指出，2020 年以前新开工核电站“通过引进技术的消化吸收以及四台机组的建设，全面掌握 AP1000 设备的设计和制造技术，从第 5 台 AP1000 机组开始能够自主设计制造主要设备”。在组织安排上，根据设备的难易程度以及国内的生产能力，国家核电公司将 AP1000 核岛设备分为四类，并依托核电项目、采取不同策略来实现国产化。其次，政策规划释放了扩大核电市场规模的信号，此阶段产业主体中制造方的数量明显增加。2003 年国家《核电中长期发展规划（2005—2020）》公布后，虽然当时核电主力堆型还未确定，但大型制造集团看到了核电的市场规模，将核电装备制造作为主营业务，并建设大型装备制造基地或者增设新厂、组建专门从事核设备生产的子公司来扩大产能，增加市场竞争优势。如上海电气集团股份有限公司（以下简称“上海电气”）2004 年开始规划建设临港核电基地，预留了超大型核电设备的厂房条件，并在 2006 年成立上海电气核电设备有限公司（钦明畅，2013）。中国二重也在 2003 年后提出“核为大、核优先”的核电装备制造发展

思路。由此，国内在核电常规岛、核岛主设备制造领域涌现了东方电气、上海电气、哈尔滨电气集团有限公司、中国一重4家供货商集团。

在设计能力与制造能力的共同提升下，2015年，中国自主三代核电技术“华龙一号”首堆示范工程——中核集团福清核电站5号机组正式开工建设。根据《〈核电中长期发展规划（2011—2020年，调整）〉终期实施评估报告》，“中国第三代核电设备国产化率可达90%，具备从原材料到核电关键设备的成套供货能力，核电装备供应链已全面覆盖国内各种堆型，并形成每年10台套及以上的核电主设备制造能力”。2021年1月30日福清核电5号机组正式投入商运，标志着中国拥有了完全自主的核电技术，正式进入核电技术先进国家行列。

总之，第三阶段通过政府部门和产业主体两个层面上同步协调实现了技术赶超中市场和技术的双重目标。自主创新的国家意志、国产化率和工程分包的行政指令、产业规划的共识信号、市场竞争多种协调机制促使研发主体加大了研发投资，最终才能实现中国三代核电的赶超。

（四）案例小结

从政策子系统的视角纵观中国核电产业的技术赶超，本文发现政府部门和产业主体两个层面的政策协调不仅是大型技术系统实现赶超的必要条件，亦是调节工业基础能力、技术学习等其他变量的重要机制（见表1）。

表1 中国核电技术发展三阶段的典型特征

		技术起步期 (1970—1985年)	引进学习期 (1986—2002年)	全面赶超期 (2003年至今)
政策协调	政府间协调	失灵：多头管理，部门博弈，技术路线摇摆	失灵：主管部门频繁变更，技术路线不定	有效：自主创新战略，建立主管部门，确定技术路线和发展规划
	政府对市场协调	失灵：计划体制下部门博弈导致企业活动停滞	初步有效：初试业主负责制、招投标制	有效：硬化国产化率指标，提高产业主体竞争
不确定性	需求不确定性	高：核电项目停滞，市场需求不明，制造任务中断	较高：市场中长期需求不明确；业主购买国产化设备积极性低	低：市场中长期需求明确、规模扩大，业主负责制和招投标制度完善
	供应不确定性	高：技术进步慢、国产化设备产品质量提升慢	较高：供应商合同履行能力低	低：形成四大制造集团，国产设备质量改进

(续上表)

		技术起步期 (1970—1985 年)	引进学习期 (1986—2002 年)	全面赶超期 (2003 年至今)
技术 赶超	市场规模	未实现：仅开工 1 座核电站，且未实现商运	部分实现：新开工 5 座核电站，累计 4 座实现商运	实现：新开工 12 座核电站，累计 14 座实现商运
	技术自主	未实现：设备国产化率低，与先行国家技术差距拉大	未实现：二代核电设计能力和设备国产化率缓慢提升，但三代技术再次落后	实现：形成具有自主知识产权的三代核电技术，设备国产化率达 90%

资料来源：作者自制。

四、跳出“追赶者陷阱”：国产化率目标与混合政策协调机制

中国核电技术在 2003 年以后跳出“追赶者陷阱”的成功经验表明，大型技术系统的赶超需要实现“既要市场规模又要技术自主”的双重目标。已有关于大型技术系统赶超的研究强调了引进后的技术学习（吕一博等，2017；吕铁、贺俊，2019），这些在核电技术赶超史中也得到了清晰的印证。例如，引进的 M310 技术后来被吸收和利用，转化为我国自主技术能力。技术引进有利于帮助后发国家在短时间内扩大市场应用规模，不能一味抹煞引进路线的贡献。然而，技术引进并不能解决大型技术系统多主体创新系统集成困境，单纯强调国家意志或市场竞争的协调机制亦是不全面的。因此，政府部门之间、政府对市场的多层同步协调变得至关重要。本研究揭示，一个在后发国家技术赶超过程中经常被提及却未得到系统阐释的指标——国产化率发挥了关键作用。国产化率目标及其实现是多种政策协调机制混合作用的结果。

首先，国产化率目标需要国家意志和行政指令作为核心的协调机制。核电国产化率在 2003 年以前一直是引导性指标而非强制约束性指标，从而导致对产业主体的约束力度不够，国产化进程缓慢。受访的某核工业集团工程师与采购团队称，由于核电属于事故追责制度极为严苛的产业，“用以前一直用的”“用贵的（进口的）就是用对的”是采购部门的普遍信念，培养国产化产品企业主要是为了增加与外国的谈判资本，而并不会真正大量采购，导致国内企业做相关产品创新往往血本无归；而当国产化率指标硬化，采购国内产品才会转变为新的“政治正确”。2003 年后，随着国家自主创新战略的逐渐出台，国产化成为设计方、制造方、业主三方共同的强制性约束。通过机构改革，国家能源局

有权力也有动机将这一指标进行切割分配,对具体产业主体而言,国产化率就变成清晰且个体化。例如秦山二期扩建项目设立之初决策层便制定了国产化率指标。2005年1月,国务院发改委召开国产化方案和技术改进论证会,强调“实现国家核电自主化领导小组确定的70%的工作目标”(李永江,2017)。而在引进三代核电AP1000技术时,国产化率的要求升级为关键设备实现100%国产化。受访专家称,“自2005年开工的岭澳二期核电站起,每个项目都有国产化率要求,且要求逐步提高”。自岭澳二期工程开始,中国核电站建设彻底摆脱了“交钥匙工程”模式,自主知识产权的技术有了更多落地机会,设备国产化率得到跨越式提升。^①

其次,共识信号、市场竞争等协调机制的混合有效抑制了行政指令的负面作用,激发分散的产业主体的创新动机,实现大型技术系统国产化率目标的整体实现。如果缺少市场竞争,国产化率要求有可能让受保护的本土企业形成依赖,从而丧失自主创新的动力和能力。此阶段政府有意引入竞争机制,利用国家科技重大专项,在关键技术节点布局多家有竞争力与积极性的单位参与研制。因此,此阶段是三个阶段中核电政策子系统产业主体数量最多、竞争压力最大,也是最具创新活力的时期,不仅业主集团在核电发展规划下进行产能竞争,加速了三代核电技术的研发,市场规模的扩大和招投标制度的完善也使得各装备制造集团具备主动争取订单的竞争意识,加大对核电装备的专用投资。

五、结论

本文通过追踪中国核电产业实现赶超的历史过程,得出以下结论。(1)大型技术系统赶超包括市场规模和技术自主双重目标,目标实现绩效与技术所在政策子系统的特性密切相关。核电政策子系统具有碎片化的结构和行为目标。因此系统赶超需要在政府部门和产业主体层面上同步进行政策协调,协调机制主要包括国家意志、行政指令、共识信号和市场竞争等。(2)政策协调通过降低产业主体面临的供需不确定性,解决大型技术系统中产业主体专用性投资不足的激励困境。(3)中国核电跳出“有市场规模、无自主技术”的“追赶者陷阱”,关键在于通过国家意志和行政指令等协调机制建立了国产化率目标硬约

^① 岭澳二期及之后的二代改进型核电站设备国产化率为:岭澳二期(64%),秦山二扩(70%),红沿河(>75%),福建宁德(1号、2号机组75%,3号、4号机组85%),阳江(83%),方家山(80%),海南昌江(82%),防城港一期(80%);三代核电站设备国产化率为:台山(50%),三门(1号机组10%、2号机组60%),海阳(1号机组36%、2号机组63%),福清5号(90%)。数据由各核电站官网和访谈对象提供与验证。

束，并在市场竞争和产业规模信号的共同作用下，形成了投资回报的可信承诺，激发分散的产业主体加大技术专用投资和协同创新。

核电在陷入“追赶者陷阱”后又成功跳出的经历对后发国家的技术赶超具普遍意义上的启发：首先，本文政策子系统的分析视角进一步深化了对大型技术系统赶超中政府角色的认识。核电技术赶超历程说明，碎片化的官僚体系与技术系统创新的矛盾是恒在的，政府部门的本位主义可能阻碍技术系统创新，只有中央决策层的坚定的自主创新意志和行政指令，才能破解部门利益博弈，对产业主体释放自主创新的可信承诺。

其次，核电跳出“追赶者陷阱”的经验体现了政策协调对大型技术系统创新的重要性。大型技术系统一般涉及多政府部门和多产业主体，政策协调是大型技术系统创新所面临的共性问题。核电技术赶超的历史历程说明对于大型技术系统，只有通过政策协调减轻政策子系统中政府部门博弈给产业主体所带来的供需不确定性，才能激励创新主体更持续与稳定的投资，发挥工业基础能力优势。相反，政策协调失灵会带来巨大的不确定性，降低产业主体技术投资的积极性，技术进步停滞，甚至丢失原有的技术能力。

最后，本文将政策协调引入大型技术系统创新研究，提出政策协调通过影响组织面临的不确定性而影响组织创新产出的理论模型，并基于中国核电 50 余年的技术赶超历程提炼了不同协调机制的作用，为创新领域的协调研究做出贡献。

本文的研究结论具有一定的局限性。由于中国核电技术为赶超型技术，存在确定性的技术来源和目标，因此政府通过政策协调尤其是强制性协调机制降低大型技术系统中供需不确定性可能是高效的。未来中国将进入新兴技术和产业的未知领域，面临更大的不确定性，政府致力于不确定性的协调具有更为广泛的普遍意义，但政策协调的机制与工具应是更为多样化的和开放性的。

参考文献

- 陈玲、薛澜 (2011). “执行软约束”是如何产生的？——揭开中国核电谜局背后的政策博弈. 国际经济评论, 2: 147 - 160 + 6.
- Chen, L., & Xue, L. (2011). “Soft Implementation Constraint” and Political Gaming in China’s Nuclear Power Puzzles. *Journal of Public Administration*, 2: 147 - 160 + 6. (in Chinese)
- 陈玲、付宇航 (2022). 象征性优先权理论与国有企业激励机制. 比较, 5: 226 - 257.
- Chen, L., & Fu, Y. H. (2022). Symbolic Priority Theory and Incentive Mechanisms in State-Owned Enterprises. *Comparative Studies*, 5: 226 - 257. (in Chinese)
- 封凯栋、姜子莹、赵亭亭 (2021). 国家工业理解能力：基于中国铁路机车与汽车产业的比较研究. 社会学研究, 3: 91 - 113, 227 - 228.
- Feng, K. D., Jiang, Z. Y., & Zhao, T. T. (2021). State Capacity in Understanding Industrial Activities: A Comparative Study Based on China’s Railway Locomotive and Automobile Industries. *Sociological Studies*,

- 3: 91–113, 227–228. (in Chinese)
- 黄阳华、吕铁 (2020). 深化体制改革中的产业创新体系演进——以中国高铁技术赶超为例. *中国社会科学*, 5: 65–85+205–206.
- Huang, Y. H. & Lyu, T. (2020). Evolution of the Industrial Innovation System in the Deepening of System Reform: A Case Study of China's Catch-up in the World High-speed Rail Industry. *Social Sciences in China Press*, 5: 65–85+205–206. (in Chinese)
- 黄毅诚 (2013). 能源部的成立与撤销. *能源*, 3: 106–110.
- Huang, Y. C. (2013). The Creation and Abolition of the Ministry of Energy. *Energy*, 3: 106–110. (in Chinese)
- 江鸿、吕铁 (2019). 政企能力共演化与复杂产品系统集成能力提升——中国高速列车产业技术追赶的纵向案例研究. *管理世界*, 35(05): 106–125+199.
- Jiang, H. & Lyu, T. (2019). Government-Firm Capability Coevolution and Development of CoPS Integration Capabilities: A Longitudinal Case Study of Technological Catch-up in the Chinese High-Speed Train Industry. *Journal of Management World*, 35(05): 106–125+199. (in Chinese)
- 李鹏 (2004). 李鹏核电日记. 北京: 新华出版社.
- Li, P. (2004). *Li Peng's Nuclear Power Diary*. Beijing: Xinhua Publishing House. (in Chinese)
- 李永江 (2017). 与核电国产化同行. 北京: 中国文史出版社.
- Li, Y. J. (2017). *Walking with Nuclear Power Nationalization*. Beijing: China Culture and History Press. (in Chinese)
- 林宗棠 (2013). 总序. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Lin, Z. T. (2013). The General Preface. In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment Manufacturing: From the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 刘堂炜、丁寿贤、邵柏麟、罗陞汉 (2013). 国家百万千瓦级核电装备制造布局. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Liu, T. W., Ding, S. X., Shao, B. L., & Luo, S. H. (2013). The General Preface. In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment Manufacturing: From the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 路风 (2019). 冲破迷雾——揭开中国高铁技术进步之源. *管理世界*, 9: 164–194+200.
- Lu, F. (2019). Break Through the Fog: Reveal the Origin of Chinese High-Speed Railway Technology Advances. *Journal of Management World*, 9: 164–194+200. (in Chinese)
- 吕铁、贺俊 (2019). 政府干预何以有效: 对中国高铁技术赶超的调查研究. *管理世界*, 35(09): 152–163+197.
- Lyu, T. & He, J. (2019). Why Government Intervention Works: An Investigation of China's High Speed Rail Technology Catch-up. *Journal of Management World*, 35(09): 152–163+197. (in Chinese)
- 吕一博、韩少杰、苏敬勤 (2017). 翻越由技术引进到自主创新的樊篱——基于中车集团大机车的案例研究. *中国工业经济*, 8: 174–192.
- Lyu, Y. B., Han, S. J., & Su, J. Q. (2017). Overcome Obstacles Between Technology Import and Independent Innovation: A Case Study of CNR Dalian Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd. *China Industrial Economics*, 8: 174–192. (in Chinese)
- 迈克尔·豪利特、M. 拉米什 (2006). 公共政策研究——政策循环与政策子系统. 庞诗等译. 北京: 生活·读书·新知三联书店出版社.
- Howlett, M., & Ramesh, M. (2006). *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems* (Pang, S. Trans.). Beijing: SDX Joint Publishing Company. (in Chinese)
- 张明畅 (2013). 临港基地一期工程. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Qin, M. C. (2013). The Lingang Base Phase I Project. In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment*

- Manufacturing: from the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 汤紫德 (2007). 核电在中国. 南京: 江苏人民出版社.
- Tang, Z. D. (2007). *Nuclear Power in China*. Nanjing: Jiangsu People's Publishing House. (in Chinese)
- 唐洪驹、朱兴梓 (2013). 国内三大电气重要举措东方电气举措. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Tang, H. J. & Zhu, X. Z. (2013). Important Initiatives of China's Three Major Electric Groups-Dongfang Electric Group Initiatives. In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment Manufacturing: from the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 汪福全、邓林涛、姚若桐等 (2013). 中国二重核铸锻件生产能力提升. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Wang, F. Q., Deng, L. T., & Yao, R. T. (2013). The Enhancement of Nuclear Castings and Forgings Production Capacity of China National Erzhong Group Co. . In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment Manufacturing: from the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 温鸿钧、余娜 (2016). 中国核电自主起步与秦山二期建设. 能源, 5: 100 – 103.
- Wen, H. J. & Yu, N. (2016). China's Independent Start in Nuclear Power and the Construction of Qinshan II. *Energy*, 5: 100 – 103. (in Chinese)
- 忻惠发、李晓筠、陈松业等 (2013). 反复研发探索安全可靠设备. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Xin, H. F., Li, X. Y. & Chen, S. Y. et al. (2013). Repeated Research and Development to Explore Safe and Reliable Equipment. In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment Manufacturing: from the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 徐玉明 (1999). 关于核电发展和核行业管理的思考. 中国核工业, 3: 17 – 19.
- Xu, Y. M. (1999). Reflections on Nuclear Power Development and Nuclear Industry Management. *China Nuclear Industry*, 3: 17 – 19. (in Chinese)
- 姚文君、宋浩亮、缪德明 (2013). 谋划艰难曲折筹建“728 工程”. 载朱兴梓主编《中国核电装备制造: 从“728 工程”到沿海重型装备制造基地》. 北京: 中国电力出版社.
- Yao, W. J., Song, H. L., & Miu, D. M. (2013). Difficult and Tortuous Planning to Build “728 Project”. In Zhu, X. Z (Ed.). *China's Nuclear Power Equipment Manufacturing: from the “728 Project” to the Coastal Heavy Equipment Manufacturing Base*. Beijing: China Electric Power Press. (in Chinese)
- 张国宝 (2015). 核电史话. 中国经济周刊, 11: 47.
- Zhang, G. B. (2015). Nuclear Power Chronicles. *China Economic Weekly*, 11, 47.
- 张慧 (2014). 解密“华龙一号”. 能源, 4: 38 – 45 + 112.
- Zhang, H. (2014). Demystifying “Hualong-1”. *Energy*, 4: 38 – 45 + 112. (in Chinese)
- 赵志德、何宏龙 (2007). 反应堆下部堆内构件的损坏分析和修复方案. 核电工程与技术, 20(2): 4.
- Zhao, Z. D., He, H. L. (2007). Damage Analysis and Repair Options for Lower Reactor Components. *Nuclear Power Engineering and Technology*, 20(2): 4. (in Chinese)
- 中国核动力研究设计院 (2021). 国之重器第三代先进核电“华龙一号”核心技术研发始末. 北京: 人民出版社.
- Nuclear Power Institute of China. (2021). *The Research and Development History of the Third Generation of Advanced Nuclear Power “Hualong-1” Core Technologies*. Beijing: People's Publishing House. (in Chinese)
- Aghion P, J. Cai, M. Dewatripont, L. Du, A. Harrison, & P. Legros. (2015). Industrial Policy and Competition. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 7(4): 1 – 32.
- Arrow, K. J. (1971). The Economic Implications of Learning by Doing. *Review of Economic Studies*, 29(3): 155 – 173.
- Arshinder, K., A. Kanda, & S. G. Deshmukh. (2011). A Review on Supply Chain Coordination, Coordination Mechanisms, Managing Uncertainty and Research Directions. *Supply Chain Coordination Under Uncertainty*, 39 – 82.

- Chen, L. & B. Naughton. (2016). An Institutionalized Policy-making Mechanism, China's Return to Techno-Industrial Policy. *Research Policy*, 45(10): 2138–2152.
- Christensen, T. & P. Lægreid. (2007). The Whole-of-Government Approach to Public Sector Reform. *Public Administration Review*, 67(6): 1059–1066.
- Cohen, W. M. & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 128–152.
- George, A. L. & A. Bennett. (2005). *Case Studies and Theory Development in the Social Sciences*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Hobday, M., D. Andrew & P. Andrea. (2005). Systems Integration, A Core Capability of the Modern Corporation. *Industrial and Corporate Change*, 14(6): 1109–1143.
- Hughes, T. P. (1983). *Networks of Power, Electrification in Western Society, 1880–1930*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.
- Kankaanpää, J., L. Oulasvirta & J. Wacker. (2014). Steering and Monitoring Model of State-owned Enterprises. *International Journal of Public Administration*, 37(7): 409–423.
- Kroll, H. & D. Schiller. (2010). Establishing an Interface Between Public Sector Applied Research and the Chinese Enterprise Sector, Preparing for 2020. *Technovation*, 30(2): 117–129.
- Lee, K. (2021). *China's Technological Leapfrogging and Economic Catch-up: A Schumpeterian Perspective* (1st ed.). Oxford University Press.
- Lundvall, B. (1992). *National Systems of Innovation, Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*. London: Pinter.
- Lindblom, C. E. (1965). *The Intelligence of Democracy. Decision Making through Mutual Adjustment*. New York: Free Press.
- Molenveld, A., K. Verhoest, J. Voets & T. Steen. (2020). Images of Coordination: How Implementing Organizations Perceive Coordination Arrangements. *Public Administration Review*, 2020, 80(1): 9–22.
- Peters, B. G. (2015). *Pursuing Horizontal Management: The Politics of Public Sector Coordination*. Lawrence: University Press of Kansas.
- Pollitt, C. (2003). Joined-up Government: A Survey. *Political Studies Review*, 1(1): 34–49.
- Serger, S. & M. Breidne. (2007). China's Fifteen-Year Plan for Science and Technology, An Assessment. *Asia Policy*, 4(1): 135–164.
- Shen, H., N. Mei & Y. Gao. (2019). Improving Radical Innovation in China's Manufacturing Firms: A Resource Management-based Interpretation of Social Ties and Firm Capabilities. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 7: 1034–1054.
- Tönurist, P. (2015). Framework for Analysing the Role of State Owned Enterprises in Innovation Policy Management, The Case of Energy Technologies and EestiEnergia. *Technovation*, 38: 1–14.
- World Bank. (1995). *Bureaucrats in Business*. World Bank.

责任编辑：黄冬娅