

# 大国科技竞争下的前沿技术路线布局 与研发资助策略\*

陈 茁 赵艺璇 刘 运

**内容提要:**随着我国工业体系在全球价值链上的渐进升级,我国企业需直面与发达国家在关键核心技术研发领域的排他性竞争,并抢占前沿技术领域的话语主导权。本文构建了一个考虑外国企业可能率先实现技术突破的非对称动态研发竞赛模型,理论分析了我国企业的技术路线与研发投入选择,以及相应的政府最优技术路线布局与研发投入资助策略。研究发现,在单一技术路线下,政府应根据外部时间压力动态调整资助策略:压力较小时,遵循“研发效率优先”原则集中支持低成本企业;面临紧迫压力时,则转向“突破时间优先”,通过资助高成本企业维持并行研发,以效率换取整体胜率。当存在多条技术路线时,企业基于利润最大化目标倾向于“扎堆”同一技术路线研发,从而忽视其他路线的潜在突破可能,导致市场自发的技术路线选择背离政府最大化整体胜率的目标。政府可通过对选择劣势路线的企业提供路线布局资助,抑制企业在低成本路线上的“内卷式”研发,形成多路线并行探索的协同研发格局。本文提出的“布局—投入”两阶段研发资助策略在尊重企业自主决策权的同时,促进了企业目标与国家战略的协同,为在市场经济条件下完善关键核心技术攻关的新型举国体制提供了学理基础。

**关键词:**大国科技竞争 外部时间压力 创新激励政策 技术路线布局

## 一、引言

近年来,随着我国高端制造业的快速升级迭代,我国与欧美国家的经贸关系已从低技术领域的贸易互补,转变为在高端产业链上的直接竞争与替代。面对这一国际分工格局的深刻转变,习近平总书记明确指出:“世界百年未有之大变局加速演进,科技革命与大国博弈相互交织,高技术领域成为国际竞争最前沿和主战场,深刻重塑全球秩序和发展格局。”“必须进一步增强紧迫感,进一步加大科技创新力

\* 陈茁、刘运(通讯作者),山东大学经济研究院,邮政编码:250100,电子信箱:zhuochen@sdu.edu.cn, yunliucer@sdu.edu.cn;赵艺璇,南开大学经济学院,邮政编码:300071,电子信箱:yixuanzhao@mail.nankai.edu.cn。本文研究得到国家社会科学基金一般项目(25BJL023)的资助。作者感谢匿名审稿专家与第六届微观经济理论论坛(2024)与会专家提供的建设性意见。当然,文责自负。

度,抢占科技竞争和未来发展制高点。”<sup>①</sup>《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》中亦明确将“重点领域关键核心技术快速突破”“并跑领跑领域明显增多”列为“十五五”时期经济社会发展的主要目标之一。在现阶段大国科技竞争与全球供应链重构的时代背景下,我国企业在诸多与外国企业进行的前沿技术研发竞争中,面临着“自身技术路线的可行性”与“国外技术突破的外部时间压力”双重风险。一方面,由于近年来欧美国家通过各类禁售法案和排他性技术联盟对我国高新技术产业进行持续打压,我国企业无法采用现有成熟技术路线,只能另辟蹊径,将研发资源投入可行性未知的技术路线;另一方面,具有技术优势的外国企业一旦率先取得科技突破,能够通过制定排他性技术标准与申请专利保护等方式形成技术壁垒,在一定时期内获得基于技术垄断地位的超额利润,并通过将利润再投入研发进一步巩固其领先优势。

由于存在上述自身技术路线的可行性与取得突破的外部时间压力两大风险,我国企业即使持续投入大量资源,也无法确保能够在现阶段的大国科技竞争中取得突破并实现赶超。这无疑严重挫伤了我国企业持续加大自主研发投入的信心与动力。鉴于此,在政策实践层面,中央与各级地方政府出台了一系列政策扶持措施,分担企业研发活动的成本与风险,鼓励企业在前沿关键领域增加研发投入,以尽快实现前沿技术关键领域突破,从而在国际产业分工中抢占技术主导地位,实现我国经济高质量发展的战略目标。<sup>②</sup>而在理论研究方面,虽然现有文献已关注到大国科技竞争这一变量对于我国创新激励政策设计与实施的潜在影响,但多聚焦特定产业或“纵向”产业链环节中不同政策工具的绩效分析,而未将同时面临突破时间压力与失败可能性时,政府与企业在多技术路线间的“横向”协调与布局纳入分析框架。

以此为背景,本文以本国企业随研发时长增加而指数递减的后验信念来描述“自身技术路线的可行性风险”(Keller et al., 2005),并以外国企业持续研发所形成的瞬时突破到达率来刻画国外率先实现技术突破的“外部时间压力”。通过构建一个包含两家本国企业与一家(具有技术优势的)外国企业的非对称动态研发竞赛模型,系统分析我国企业在面临上述双重风险时关于技术路线与研发投入的自发选择,并进一步讨论我国政府在不同的外部时间压力、企业研发成本与路线选择下,如何通过差异化的创新激励政策,协调企业盈利动机与国家战略目标之间的偏差,从而最大化我国企业在相关前沿技术领域率先取得突破的整体概率。

对于现实中具有时间紧迫性的前沿技术攻关领域,尽管政企双方均难以事先

① 习近平:《朝着建成科技强国的宏伟目标奋勇前进》,《求是》2025年第7期。

② 其中,2024年3月科技部与财政部联合印发的《国家重点研发计划管理暂行办法》中明确提出对“事关产业核心竞争力、整体自主创新能力和国家安全的战略性、基础性、前瞻性重大科学问题、关键共性技术和产品研发”等进行重点资助。各地政府所出台的地方性政策也强调通过财政科技专项资金,加强企业在前沿技术领域研发创新的支持力度。其中,包括湖北省《关于进一步提高全社会研发投入的若干措施》、海南省《关于支持企业建立研发机构促进企业加大全社会研发投入若干措施》、四川省《促进全社会加大研发投入工作方案》以及《上海市支持企业加强基础研究增强高质量发展新动能的若干措施》等。

掌握路线的可行性信息,政府仍可基于申报评审与调研评估获取企业研发成本与效能等方面的关键信息,并通过阶段性评估、预算核查等动态监管措施跟踪企业研发投入。基于这一制度特征,本文聚焦包括科技重大专项指南、政府产业引导基金在内的研发投入资助政策,探讨如何设计兼顾“技术路线布局”与“研发投入时长”双维度的资助合约,以更有效地引导本国企业在技术路线与研发投入选择上与政府目标保持一致。本文发现,当仅有一条成功概率较高的技术路线可供选择时,<sup>①</sup>外部时间压力对政府资助策略的偏向具有重要影响:当不存在外国企业持续研发所带来的外部时间压力时,政府应集中预算,优先支持边际研发成本更低的企业,以最大化其研发投入时长;而在面临技术突破时间紧迫性较高的情况下,政府将有动机向边际成本较高的企业提供资助,以通过牺牲部分静态的研发投入效率,延长两家本国企业的并行研发时长,从而在动态竞争层面提升我国企业整体胜率。上述分析表明,我国前沿技术资助政策应根据大国科技竞争的阶段性特征实施“分类分级”动态调整:对研发周期相对宽裕的领域,可延续竞争择优机制,集中资源支持“专精特新”等高效企业;而对需在短期内实现突破的关键领域,则应由单点扶持转向多主体并行探索,扩大试错与协同攻关的范围,以提升我国在有限时间窗口内实现技术突破的整体效率。

当某项前沿技术研发存在多条具有潜在可行性的技术路线时,<sup>②</sup>由于政府仅关心本国企业是否能够在最短时间内取得技术突破,其不可避免地会与基于利润最大化目标的企业在技术路线的选择上存在偏好差异。因此,政府需要首先考虑如何通过“技术路线布局资助”对本国企业研发行为进行引导,协调统一政府与企业的行为目标。而在技术路线确定后,政府即可参照前述单路线情形,结合外部时间压力与企业间研发成本差异,分别与两家企业签订基于研发投入时长的资助合约。本文发现,在没有外国企业持续研发对我国企业形成的研发时间压力时,由于两家企业同处于一条技术路线的集中研发模式将使我国整体失去探索另一条技术路线可行性的机会,政府的最优布局均是两家本国企业各自进入一条技术路线的分散研发模式。而当面临外部时间压力时,政府的最优技术路线布局取决于两条技术路线研发成本的差异:当路线间研发成本差异较小时,政府希望通过高效率企业承担高成本技术路线、低效率企业进入低成本技术路线的模式实现分散研发;而当两条技术路线间的研发成本差异较大时,引导高效率企业分散至高成本路线所带来的胜率边际增益,将不足以抵消由此增加的总研发投入成本,此时政府的最优策略将是引导两家企业集中资源于低成本路线进行研发攻关。

<sup>①</sup> 虽然在前沿技术研发过程中,一般无法在事前确定不同技术路线的可行性,但当有一条技术路线的成功概率远高于其他的可能路线时,本文认为该项具体技术的研发为单条技术路线情形。比如,在第二部分关于氢储能技术的案例中,相较于非氟化膜(如聚芳醚、聚砜类)等制氢技术,全氟磺酸膜(PFSA)是目前学界与业界公认成功概率最高的质子交换膜制氢技术路线。

<sup>②</sup> 比如,在量子计算领域,虽然超导量子计算与离子阱量子计算技术均具有较大的技术突破可能性,但相较于离子阱量子计算技术,超导量子计算技术应用范围更广、商业化前景更为明晰,已吸引到包括阿里巴巴(阿里云)、百度、腾讯、科大国盾量子等国内多家公司投入该技术路线的研发。

不同于政府所关注的大国科技竞争整体胜率,两家本国企业仍以自身利润作为决策依据;作为研发成本的实际承担者,其对企业间及技术路线间的成本差异也更为敏感。本文发现,无论研发成本差异存在于企业层面还是技术路线层面,当两家企业或是两条技术路线的研发投入成本差异较大时,两家本国企业都倾向于“扎堆”研发投入成本更低的优势技术路线。而由于突破亦可能出现在研发成本更高的劣势技术路线上,在政府不加干预的情况下,相对劣势技术路线对企业没有足够吸引力,该路线的潜在成功可能性被忽视。此时,通过市场这一“看不见的手”所自发形成的技术路线选择结果,并不能最大化政府所关注的本国企业在研发竞赛中的整体胜率。而通过“看得见的手”资助选择相对劣势技术路线的企业,政府能够有效协调本国企业在技术路线上的研发分工,引导本国企业从低成本技术路线上的“内卷式”研发,转向探索不同技术路线可行性的协同分工新格局。这一基于最优技术路线布局的关键核心技术研发资助策略,既保留了企业在研发路线选择上的自主性,又有效促进企业研发资源投入与国家战略目标相协调,为完善我国社会主义市场经济条件下关键核心技术攻关新型举国体制提供了学理依据。

最后,注意到前述分析隐含假设了政府具备完全信息(能精准识别外部时间压力与各项研发成本),且政府的短期资助政策不会引发企业的道德风险。本文进一步讨论了包括激励不相容与成本不确定等现实约束对大国科技竞争语境下政府路线布局与研发资助策略的影响。<sup>①</sup>分析结果表明,尽管基于实际突破的研发奖金与基于实际支出的研发补贴在应对道德风险与成本信息不对称时具有优势,但基于研发时长的事前资助在降低政府财政支出压力、及时缓解企业研发初期流动性约束并提高研发启动可行性等方面仍具有不可替代的作用。因此,在最优研发激励政策的实施层面,政府应根据监管能力、成本不确定性与外部时间压力,动态调整财政预算在上述三类创新激励工具间的权重,并通过分阶段拨付、过程监管、成果奖励和社会资本协同投入,构建风险共担、激励相容的前沿技术支持体系。<sup>②</sup>

相较现有文献,本文的贡献体现在以下三个方面:第一,现有文献多关注大国博弈背景下关键核心技术创新激励政策对于产业链上下游企业间研发行为与产出的“纵向”影响(安同良等,2023;寇宗来和孙瑞,2023;陈志远等,2024;荣健欣等,2025),或仅分析了企业基于自身利益在不同技术路线之间自主“横向”选择所造成社会总体福利损失(Bryan & Lemus, 2017; Hopenhayn & Squintani, 2021),而未将不同外部环境下政府与企业对于不同技术路线的“横向”选择与协调纳入分析框架

<sup>①</sup> 因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。

<sup>②</sup> 具体而言,当政府监管能力不足、企业道德风险突出时,激励应当后移,通过研发奖金强化激励相容;而当研发成本高度不确定、尾部风险较大时,则应提高研发补贴比重,以分担高成本试错风险并防止项目因现金流压力中断。因篇幅所限,相关内容详见本刊网站登载的附录。附录中亦验证了本文主要结论稳健性的拓展分析,包括:(1)允许技术路线间存在信息溢出效应;(2)允许企业转换已选定的技术路线;(3)政府以最大化本国企业总利润作为其目标函数;(4)当外国企业率先取得突破获取国际市场的垄断收益后,本国企业仍可针对国内市场的垄断收益开展研发竞赛;(5)参与研发竞赛的本国企业数量可变时,政府的最优技术路线布局。

内。<sup>①</sup>由于现有文献所考虑的“卡脖子”技术多属于外国企业率先突破后的“追赶型研发”,较少考虑前沿技术研发的结果不确定性与路线不可行风险,从而使得相关文献中我国政府的创新激励政策设计多偏向于研发启动后基于实际支出的研发补贴,而对于能够缓解启动期风险的事前资助政策(如国家科技重大专项、政府产业引导基金),尚缺乏对其实施效能与优化机制的系统性分析(余明桂等,2016;叶祥松和刘敬,2020;安同良和千慧雄,2021;张杰,2021;陈强远等,2022;何晴等,2022;贺俊,2022;刘志彪,2024)。本文通过引入外部时间压力这一变量,系统刻画大国科技竞争下我国率先实现前沿技术突破的紧迫性,进而分析政府如何在时间压力、企业效率与技术路线可行性等多维环境变化下,设计差异化资助策略,提升企业持续研发意愿,协调政企在技术路线上的偏好。相关结论为完善新型举国体制下的创新激励政策体系提供了理论基础。

第二,本文借鉴了连续时间下的指数学习(Exponential Bandit)理论框架(Bolton & Harris, 1999; Keller et al., 2005)<sup>②</sup>来描述我国企业在关键核心技术研发上所面临的结果不确定性——若技术路线不可行,即使企业持续研发投入亦无法取得突破,然而技术路线的可行性需企业通过持续研发投入方能被验证。换言之,在指数学习理论框架下,研发投入与产出并非遵循线性关系;正因如此,相较于静态下的最优机制设计模型(Myerson, 1981),该理论框架更贴近前沿技术研发的科学规律与实践特征。本文将我国企业在前沿技术领域与外国企业的科技竞争,抽象为一个关于技术路线与研发投入的非对称动态博弈问题,不仅拓展了现有仅考虑对称博弈的连续时间研发竞赛文献(Halac et al., 2017; Bimpikis et al., 2019),也弥补了指数学习理论未将激励机制设计纳入分析框架的不足(Halac et al., 2016; Moroni, 2022; Liu & Wong, 2024)。

第三,针对大国科技竞争下前沿技术研发的高风险与高不确定性,本文在政策建议上提出了基于内外部竞争环境、政府监督力度、财政预算约束等现实因素变化,动态调整资助策略偏向,协调政企在技术路线选择上的目标分歧。相关政策建议通过结构化的研发资助政策,引导国内企业间形成“有组织研发”格局,在应对时间紧迫性的同时也分散了技术路线不可行风险,为实现“有效市场”与“有为政府”在关键核心技术攻关中协同增效,提供了具体可操作的政策指引。

## 二、特征事实与现实案例

现阶段我国政府与企业所面对的大国科技竞争具有以下三个方面特征。第

<sup>①</sup> 关于企业在不同技术路线之间的横向选择,Bryan & Lemus(2017)与Hopenhayn & Squintani(2021)的研究表明,在缺乏政策干预的市场竞争中,企业往往出于风险规避、先发优势争夺和短期收益考量而集中于热门或相对易于实现的技术路线,由此造成市场自发路线选择下的动态拥挤,进而造成市场均衡偏离了社会最优的多样化探索布局。

<sup>②</sup> 指数学习(Exponential Bandit)的翻译参考了李文健等(2021)。本文所研究的这类企业仅通过投入持续更新其关于某一技术路线可行性信念的动态学习问题也被称为“单臂老虎机”(One-armed Bandit)。为了简化模型分析,本文不考虑企业可动态更换技术路线的“多臂老虎机”(Multi-armed Bandit)问题。

一,由于前沿技术研发的结果不确定性与潜在的技术封锁风险,我国企业需在多条可行性与研发成本存在差异的技术路线中进行选择。第二,若外国企业率先取得技术突破,能够通过制定排他性技术标准与形成技术联盟等方式,获得基于技术垄断地位的超额利润。第三,政府需从国家战略层面根据外部竞争环境变化,引导企业进行有效技术路线布局,规避单一技术路线失败所带来的风险。

以氢燃料电池中的氢储运技术为例,<sup>①</sup>相较于传统的高压气态、低温液态等储氢技术,有机液态储氢具有储氢密度与安全性高、可重复使用、运输成本低等多方面技术与成本优势,被视为最有希望取代现有技术并应用于新一代氢燃料电池中的储氢技术。近年来受欧美国家针对我国陆续出台的一系列技术转让与高端设备出口限制条例影响,我国企业无法获取高性能催化剂、加氢反应器等有机液态储氢研发与生产设备,<sup>②</sup>转而需自行研发催化剂并设计相应的加氢反应设备。然而,我国企业一方面面临其所采用的国产替代催化剂与加氢生产流程是否可行的风险(自身技术路线的可行性风险);另一方面,随着时间推移,包括丰田与本田汽车在内的国外氢燃料电池先行企业依托其在高性能催化剂及既有工艺流程方面的积累,更有可能率先实现有机液态储氢技术突破,从而在新一代氢燃料电池市场形成技术垄断(国外技术壁垒的时间压力风险)。面对这一战略抉择,国家和地方政策并未把资源集中于当前较成熟的低成本技术路线上,而是有意识地通过资源倾斜、溢价补贴高成本技术路线,以部分牺牲静态效率的方式换取多路线并行探索的格局,从而最大化我国整体突破胜率。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》明确提出,要提高高压气态储运效率、降低其成本,同时“推动低温液氢储运产业化应用,探索固态、深冷高压、有机液体等储运方式应用”;2025年国家能源局组织的氢能试点申报,又将有机液体储氢、固态金属储氢、低温液氢储氢、氨醇载体储氢等纳入“高密度、多元化储存”试点方向;上海临港的氢能政策也明确支持突破低温液氢储氢、固态储氢、长距离管道输氢等关键技术,并探索固态、液态、有机液体等储运方式应用。

另一个现阶段大国科技竞争的案例来源于量子计算技术。作为一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式,量子计算技术近年来已成为全球科技竞争的制高点。尽管中国量子计算产业发展迅速,并在以“祖冲之三号”为代表的超导量子计算与“九章三号”为代表的光量子计算领域,与欧美形成“三足鼎立”的竞争格局,但受欧美技术封锁与出口管制影响,我国企业难以获取包括稀释制冷机、高端芯片等在内的核心设备;同时,欧美国家通过组建排他性技术联盟的方式,试图将中国排除在全球量子生态和未来技术标准制定之外。在现阶段中国量子计算产业实践中,超导路线因应用前景较为清晰、产业链配套相对更成

<sup>①</sup> 参见国家发展改革委与国家能源局联合印发的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》、国家能源局科技司发布的《中国氢能发展报告(2023)》、波士顿咨询公司发布的《2023中国氢能产业展望白皮书》等相关背景资料。

<sup>②</sup> 包括但不限于2021年欧盟修订的《欧盟两用物项出口管制条例》、2022年美国国会通过的《通胀削减法案》、2023年美国商务部修订的《出口管理条例》等。

熟,已吸引包括阿里巴巴、百度、腾讯、科大国盾量子在内的多家企业和科研资源进入,但这并不意味着离子阱、中性原子、光量子等路线缺乏战略价值。相反,在技术范式尚未收敛、国际竞争高度激烈的条件下,若资源过早集中于单一路线,一旦该路线后续工程化受阻,本国整体突破概率反而可能下降。基于这一考量,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》中已将其与生物制造、氢能和核聚变能等新兴产业列为“十五五”期间新兴支柱产业发展方向,地方政府也积极出台针对性的量子科技产业政策,形成了一批各具特色的地方实践。如《北京经济技术开发区关于推动量子科技和产业发展的若干措施》明确提出超导、离子阱、中性原子、光量子等方向的多技术路线布局,并通过给予一批具有前瞻性、引领性的“揭榜挂帅”项目最高3000万元的前期支持,为高风险的前沿技术研发提供“耐心资本”,确保研究人员能“沉下心”开展长期攻关。

上述实践表明,在具有外部时间压力和技术不确定性的前沿领域,政府目标并非单纯追求当前静态研发投入成本最低,而是通过对高成本路线的前期支持和风险分担,避免本国企业过早锁定于单一路线,进而提高在外部时间压力下实现突破的整体概率。然而,对照大国博弈的复杂现实,现有政策仍缺乏一套统筹外部竞争环境变动、技术路线可行性风险、企业风险承担能力、政企间技术路线选择差异的系统化与前瞻性的动态调整预案。鉴于此,本文将探讨如何通过设计精准的创新激励政策组合,引导企业实现研发资源的动态最优配置,从而确保我国在关键核心技术领域掌握长期的发展主导权与标准制定话语权。

### 三、考虑外部时间压力的前沿技术研发竞赛

#### (一)模型设定

考虑一个由三家企业( $i = 0, 1, 2$ )参与的研发竞赛。其中,企业1、企业2为“本国企业”,而企业0为具有技术优势的“外国企业”。三家企业均尝试实现一项前沿技术突破。研发竞赛没有截止时间,率先取得突破的企业可通过技术垄断与专利保护等方式获得价值为 $R$ 的垄断收益。

在三家企业中,两家本国企业由于在基础科学与前沿技术积累方面存在“后发劣势”,其所能选择的技术路线面临不可行风险。具体而言,如果企业 $i$ 选择的技术路线是可行的,则在每个时刻 $t \geq 0$ ,企业 $i$ 在 $t$ 时刻将以概率 $\lambda a_{it} dt$ 取得研发突破( $i \in \{1, 2\}$ ),如果此前没有其他企业取得突破,则该企业赢得研发竞赛;其中, $a_{it} \in [0, 1]$ 是企业 $i$ 在时刻 $t$ 的研发投入, $\lambda$ 为两家企业研发成功的随机到达概率。同时,企业 $i$ 在时刻 $t$ 相应的瞬时研发成本为 $C_{ij} a_{it} dt$ ,其中 $C_{ij} > 0$ 是企业 $i$ 沿技术路线 $j$ 进行研发的边际成本。<sup>①</sup>如果技术路线不可行,则无论是否投入研发,企业取得成功的概率均为0,瞬时研发成本仍为 $C_{ij} a_{it} dt$ 。虽然现实中政府通常不掌握前沿技术

<sup>①</sup> 如果将企业的研发投入选择拓展至 $[0,1]$ 上的连续区间, $a_{it} \in [0,1]$ ,由于假设企业具有线性研发成本且其是风险中性的,企业利润的优化问题只能得到角点解,即单位时间内企业的最优选择或是满负荷研发( $a_{it} = 1$ ),或是不投入研发( $a_{it} = 0$ )。不失一般性,令 $a_{it} \in [0,1]$ ( $i \in \{1,2\}$ )。

路线的可行性信息,但政府可通过项目申报与调研评估等形式获取企业包括研发成本与潜在成功率在内的关键参数。鉴于此,本文假设政府与两家本国企业三者间不存在不对称信息,且均能实时知悉是否已有企业取得突破。

因属于技术领先方,外国企业可沿一条无须再验证可行性的技术路线展开研发,且其边际研发成本为  $c_0 > 0$ 。假设外国企业在任一时点  $t > 0$  有  $\mu a_0 dt$  的概率取得突破。若外国企业持续投入研发,其研发成功所需时间的到达率  $\mu$  也构成了研发竞赛中本国企业所需面对的外部时间压力,即当外国企业率先取得突破,其将独占技术垄断所带来的超额收益  $R$ ,研发竞赛终止。

考虑到现实中不同前沿技术的可选技术路线数量不一,不失一般性,本文将分两种情形讨论:(1)仅有一条可行性未知的技术路线可供两家本国企业开展研发活动(单技术路线情形);(2)两家企业可在两条边际研发成本不同且可行性均未知的技术路线中选择一条路线进行技术攻关(多技术路线情形)。且由于高额的前期研发设备购置与技术路线可行性评估等沉没成本,假设技术路线选择具有不可逆性,即企业一旦选定路线便不能中途更换。<sup>①</sup>

首先,在单技术路线情形下,两家本国企业的边际研发成本差异是由企业的自身技术能力和管理水平等因素决定的,即  $C_{ij} \equiv c_i$ 。假设企业1的边际研发成本不高于企业2,即  $c_2 \geq c_1$ ,并且两家企业对技术路线可行性的初始信念相同。由于没有信息不对称,两家企业的信念演化过程完全一致。记  $p_t$  为时刻  $t$  两家本国企业在无人取得成功时认为该技术路线可行的概率,根据贝叶斯公式,两家本国企业对技术路线可行性的信念演化过程满足:

$$p_{t+dt} = \frac{p_t(1 - \lambda(a_{1t} + a_{2t})dt)}{p_t(1 - \lambda(a_{1t} + a_{2t})dt) + 1 - p_t}$$

其中,  $p_{t+dt}$  表示时刻  $t$  的研发投入仍无果后企业对于技术路线可行性的后验信念。求解信念演化过程,两家本国企业对技术路线可行性的后验信念  $p_t$  满足:

$$p_t = \frac{p_0 e^{-\lambda \int_0^t (a_{1\tau} + a_{2\tau}) d\tau}}{p_0 e^{-\lambda \int_0^t (a_{1\tau} + a_{2\tau}) d\tau} + 1 - p_0} \quad (1)$$

其中,  $p_0$  为两家本国企业在  $t = 0$  时刻关于路线可行性的初始信念。式(1)说明研发投入无果可能源于技术路线不可行,故随着时间和研发投入的积累,企业将对该技术路线的可行性逐渐悲观,其关于技术路线可行性的信念  $p_t$  随研发时长增加而递减。为避免平凡解,假设  $R > \max\{c_0/\mu, c_1/(p_0\lambda), c_2/(p_0\lambda)\}$ ,从而保证两家本国企业在竞赛初始时的研发投入严格为正。

其次,在多技术路线情形下,假设由于技术路线的选择涉及高昂的前期固定投

<sup>①</sup> 在本文理论框架下,一条技术路线特指在诸如先进制程芯片、新一代通信信息技术、新能源技术等大国科技竞争领域中某项具体技术的研发路线。比如,先进制程芯片领域内的高性能光电一体化芯片、光子计算芯片等光子芯片及关键材料技术,以及氢能技术领域中的质子交换膜制氢、含氢化合物制氢等绿色高效制氢技术等。

资,企业一旦确定技术路线后便不可再更换,且两条技术路线的可行性是独立的。此时,本国企业*i*选择技术路线*j*的边际研发成本 $C_{ij}$ 将由其自身的研发成本 $c_i$ 与所选技术路线的研发成本 $\psi_j$ 线性加总决定,即 $C_{ij} = c_i + \psi_j$ ;不失一般性,假设 $c_2 \geq c_1$ ,  $\psi_2 \geq \psi_1$ 。当两家本国企业选择相同的技术路线时,假设信念演化过程仍然服从式(1)。而当两家企业所选的技术路线不同时,由于技术路线可行性彼此独立,企业的研发结果不会影响其他企业对其所在技术路线可行性的信念。记 $p_{it}$ 为企业 $i \in \{1, 2\}$ 在时刻*t*尚没有取得成功时仍认为其所在技术路线可行的后验信念,则根据贝叶斯公式,企业*i*对其所在技术路线可行性信念的演化过程满足:

$$p_{i,t+dt} = \frac{p_{it}(1 - \lambda a_{it} dt)}{p_{it}(1 - \lambda a_{it} dt) + 1 - p_{it}}$$

可求得本国企业*i*对其所在技术路线可行性后验信念 $p_{it}$ 的演化路径为:

$$p_{it} = \frac{p_{i0} e^{-\lambda \int_0^t a_{i\tau} d\tau}}{p_{i0} e^{-\lambda \int_0^t a_{i\tau} d\tau} + 1 - p_{i0}} \quad (2)$$

其中, $p_{i0}$ 为本国企业*i*在*t* = 0时刻关于路线可行性的初始信念。<sup>①</sup>类似地,假设 $R > \max_{i,j} \{(c_i + \psi_j)/(p_{i0}\lambda)\}$ ,以保证三家企业都在竞赛开始时的研发投入为正。

两家本国企业在这一前沿技术研发竞赛中选择研发投入 $a_i$ 以最大化其期望利润。给定两家企业的行动路径 $(a_1, a_2)$ ,  $a_i = \{a_{it}\}_{t \geq 0}$ ,则企业*i*的期望利润为:

$$U_i = E \left[ P_i(a_1, a_2) \cdot R - \int_0^\infty C_{ij} a_{it} dt \right]$$

其中, $P_i(a_1, a_2)$ 为企业*i*赢得竞赛的概率。考虑到连续时间非平稳动态博弈均衡的复杂性,本文仅分析上述研发竞赛博弈的马尔可夫完美均衡(Markov Perfect Equilibrium)。

## (二)政府目标与资助策略

除了三家企业外,前沿技术研发竞赛模型中还存在一个仅能影响两家本国企业研发选择的公共部门(以下简称“政府”)。由于研发成功具有无法被企业内化的社会价值,企业作为研发成本承担者,其最优研发时长通常低于社会最优水平(Arrow, 1962),此时政府可通过设计并实施激励机制,引导企业提升研发投入,协调企业利益与社会目标之间的偏差。在当前大国科技竞争背景下,考虑到政府的战略目标为通过率先取得前沿技术突破,抢占在相关领域内的技术主导权(如制定后续相关行业技术标准、保障核心技术自主可控等),本文设定政府的激励政策目标为

<sup>①</sup> 注意到,若两家本国企业选择不同的技术路线,则由于技术路线之间的可行性独立,一家企业在其所选路线上的研发进展(是否实现突破)并不会影响另一家企业对其自身技术路线可行性的后验信念更新。换言之,企业在不同技术路线上的学习过程相互独立。比较式(1)与(2)可见,两家本国企业选择不同技术路线时关于各自所在技术路线可行性信念的衰减速度(式(2))慢于两家企业选择相同技术路线时的信念衰减速度(式(1))。

最大化本国企业赢得竞赛的整体概率(整体胜率),即:

$$P(a_1, a_2) = P_1(a_1, a_2) + P_2(a_1, a_2)$$

作为政府实施激励政策的目标函数,以切合当前国家战略导向下的政策实践逻辑。由于现实中政府与企业均不具有关于前沿技术路线可行性信息,但政府可以通过项目申报、政企调研等方式获取两家本国企业包括研发成本与成功概率在内的私有信息,因此政府可基于与企业相同的期望算子,最大化期望胜率  $E[P(a_1, a_2)]$ 。

本文假设,政府能够采取有效措施对本国企业研发行为进行监管,而无须采用其他激励措施来规避企业的机会主义行为。此时,企业的研发行为可观测且可验证,政府的政策选择仅需满足两家本国企业的参与约束,而无须再考虑两家企业的激励相容约束(赖烽辉等,2021;荣健欣等,2025)。引入上述假设主要基于下述三个方面考量:第一,从实践层面看,现实中政府在对企业提供研发资助前,会首先基于申报材料、专家评审与调研论证了解企业包括研发成本与绩效在内的私有信息,并通过阶段性评估、预算核查等方式对其研发投入进行全过程监管,从而有效抑制其机会主义行为;第二,从行为动机出发,参与企业出于其长期声誉考量,也具备一定程度的自我约束机制,从而降低背离预期的道德风险行为;第三,在本文所探讨的大国科技竞争背景下,政府所面临的首要问题并非与本国企业间的“委托代理”问题,而是如何提升本国企业在关键核心技术突破中的整体胜率。鉴于此,本文将聚焦分析政府如何通过研发竞赛开始前与两家本国企业签订(事前)研发资助合约,引导企业的技术路线与研发投入选择,以在不同研发时间压力与技术路线特征下最大化政府目标函数。

具体而言,在单技术路线情形下,政府的研发资助策略体现为通过与两家本国企业分别签订一份以研发时长为标的的资助合约,激励本国企业增加研发投入。该合约包含两部分内容:一是政府给予企业  $i(i = 1, 2)$  一笔事前定额研发投入资助(以下简称“研发资助”),记作  $S_i$ ;二是企业需进行的研发行为及需付出的研发投入,由于本文假设企业的研发成本随时间线性累加(研发投入的瞬时成本为常数),可基于企业  $i$  持续研发投入的总时长等价表述其总研发投入,记作  $x_i$ 。<sup>①</sup>此时,资助合约定义为向量  $\langle S_1, S_2, x_1, x_2 \rangle$ 。本国企业  $i(i = 1, 2)$  可以自行选择是否与政府签订这一合约。若签订合约,则资助在企业开始研发前发放,且政府对企业承诺的研发时长  $x_i$  实施完全监管。若企业  $i$  不签约,则可基于自身利润最大化考量自主决定其研发时长,且不受政府事前资助与过程监管的约束。政府的目标是最大化本国企业赢得竞赛的概率,而约束条件是最大支出不高于总预算  $B$ ,即约束条件为  $S_1 + S_2 \leq B$ 。

当一项前沿技术研发存在多条可选技术路线时,政府的研发资助策略分为“路线布局+研发投入”两阶段:第一阶段,政府将为两家本国企业提供路线布局指引与相应的“路线布局资助”,引导企业依据政府偏好进行技术路线选择。第二阶段,在确定企业所在的技术路线后,由于技术路线的选择决策不可逆,政府将参照前述单

<sup>①</sup> 注意到,通过企业持续研发投入的总时长来衡量其研发投入,这与现实中以研发投入为合同标的的研发资助协议类似。此外,在诸多国家与省部级科研课题的申请要求中,也对研发投入与周期进行了明确规定和要求。

路线情形,与企业签订基于研发时长的资助合约。不失一般性,假设该合约的设定与前述单一技术路线同构。

政府与两家本国企业 1 和企业 2 间的博弈时序(见图 1)如下:

- (1)当一项前沿技术研发有多条可选的技术路线时,政府向两家本国企业提供路线布局指引与资助;
- (2)若两家企业接受路线布局资助,则按布局指引选择相应技术路线;
- (3)在开始研发投入前,政府对两家企业分别提出资助合约 $\langle S_i, x_i \rangle$ ;
- (4)若企业  $i$  接受合约 $\langle S_i, x_i \rangle$ ,则政府在其开展研发活动前支付事前资助  $S_i$ ;
- (5)企业参与研发竞赛,并进行研发投入;
- (6)若企业  $i$  在时刻  $t$  先于外国企业取得突破,将得到市场垄断收益  $R$ 。

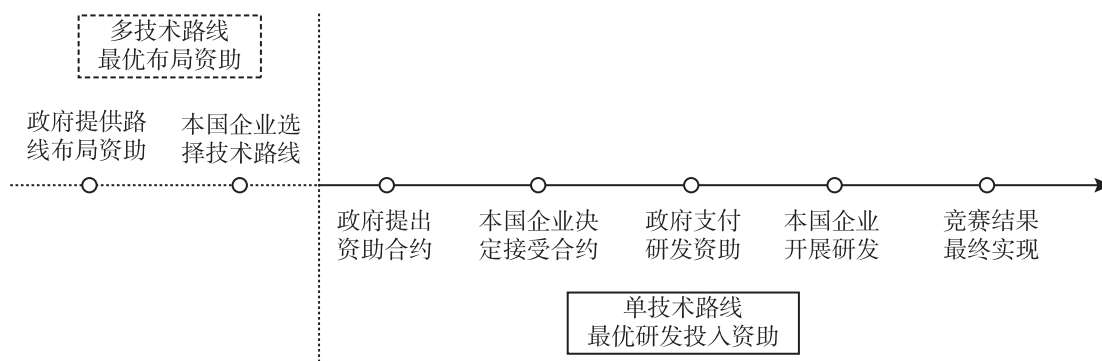


图 1 政府与企业的博弈时序

### (三)基准结论

基于上述模型设定,本文首先给出以下关于外国企业最优研发投入策略和无研发资助下两家本国企业均衡研发策略的两个基准结论。

引理 1:对于外国企业,无论本国企业采取何种策略,其都将持续进行研发投入 ( $a_{0t} = 1$ ),直到三家企业中有一家企业完成技术突破。

引理 1 表明,由于外国企业所采用的技术路线不具有不可行性风险,且本国企业的研发行为不影响其边际收益和成本,故本国企业的行为对外国企业的研发投入决策没有影响——只要研发竞赛能够带来正收益 ( $R \geq c_0/\mu$ ),外国企业都有激励持续研发投入,直至竞赛结束。由此,引理 1 保证可不失一般性地将外国企业的研发竞争简化为本国企业在前沿技术攻关中所面对的外生时间压力(由参数  $\mu$  所描述的突破瞬时到达率)。

引理 2:若政府不提供研发资助,本国企业  $i \in \{1, 2\}$  会持续投入研发直到:(1)三家企业中有任一家完成技术突破;(2)其对于所在技术路线可行性的信念衰减至  $p_i^* = c^i/\lambda R$ 。

引理 2 说明政府未采用任何事前资助政策时,本国企业的均衡策略是一个关于研发投入的最优停时,而该停时是由本国企业  $i$  关于所在技术路线可行性的后验信念演化过程决定(见式(1)与式(2))。换言之,两家本国企业会通过研发活动的实时反馈更新其关于该技术路线可行性的信念。若研发迟迟未果,企业对路线可行

性的信念将持续衰减;当信念降至临界阈值 $p_i^*$ 时,继续研发的期望边际无法再弥补其边际成本,企业将停止研发投入。

#### 四、单条技术路线下最优研发投入资助策略

本部分考虑当两家本国企业仅有一条成功概率较高的技术路线可供选择时,政府的最优资助策略。<sup>①</sup>

令 $y_i$ 表示引理2所得出的本国企业在没有政府资助干预时自发的研发投入时长,并令 $U_i(S_i, x_i)$ 表示企业 $i \in \{1, 2\}$ 接受资助合约 $\langle S_i, x_i \rangle$ 后的期望利润。基于第三部分的假设,最优合约仅需确保企业在权衡资助所带来的收益与相应监管责任后愿意接受资助(满足参与约束)即可。换言之,对任一企业 $i$ ,合约 $\langle S_i, x_i \rangle$ 满足:

$$U_i(S_i, x_i) \geq U_i(0, y_i)$$

如果两家本国企业均接受研发资助合约,则本国企业赢得研发竞赛的概率是:

$$P(x_1, x_2) = p_0 \left( \int_0^{\min\{x_1, x_2\}} 2\lambda e^{-(2\lambda + \mu)t} dt + e^{-(2\lambda + \mu)\min\{x_1, x_2\}} \int_{\min\{x_1, x_2\}}^{\max\{x_1, x_2\}} \lambda e^{-(\lambda + \mu)(t - \min\{x_1, x_2\})} dt \right)$$

上式中,第一项是两家企业在共同从事研发工作的时间( $t \leq \min\{x_1, x_2\}$ )内完成研发工作的概率,第二项为在一家企业退出后,另一家企业独自继续研发并取得突破的概率。<sup>②</sup>据此,政府的最优化问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \max_{S_1, S_2, x_1, x_2} & : P(x_1, x_2) \\ \text{s.t.} & \quad U_i(S_i, x_i) \geq U_i(0, y_i), \forall i = 1, 2 \\ & \quad S_1 + S_2 \leq B \end{aligned} \quad (3)$$

政府在单路线下的最优资助策略(研发资助合约)对应于上述优化问题(3)的解,其主要特征将在定理1中给出。

定理1:最优合约 $\langle S_1^*, x_1^*; S_2^*, x_2^* \rangle$ 满足以下性质。

(1)当不存在外部时间压力( $\mu = 0$ )时,政府将把全部预算用于边际研发成本更低的企业1。

(2)当存在外部时间压力( $\mu > 0$ )且企业间研发成本差异( $c_2 - c_1$ )较小时,最优合约将同时资助两家本国企业延长研发时长,但高效企业1的研发停时应晚于低效企业2( $x_1^* > x_2^*$ )。

(3)当两家企业研发成本相同( $c_1 = c_2$ )时,政府将给予两家企业均等的资助。

定理1体现了在大国科技竞争中,外部时间压力对我国政府资助策略偏向性的影响。当不存在外国企业持续研发所带来的外部时间压力( $\mu = 0$ )时,政府的目

<sup>①</sup> 注意到,虽然在前沿技术研发过程中,一般无法在事前确定不同技术路线的可行性,但当有一条技术路线的成功概率远高于其他的可能路线时,可认为该项具体技术的研发为单条技术路线情形。

<sup>②</sup> 其中,第一项中的 $e^{-(2\lambda + \mu)t}$ 是三家企业在并行研发的時刻 $t$ 之前没有完成研发的概率,而 $2\lambda dt$ 是给定三家企业该時刻前没有完成研发时,本国企业完成突破的概率;第二项中的 $e^{-(\lambda + \mu)(t - \min\{x_1, x_2\})}$ 是竞赛直到第一家本国企业退出也没有企业完成研发竞赛的概率,积分中的被积函数是没有停止研发的企业取得突破时间的概率密度。

标函数可简化为最大化两家本国企业的研发总投入( $x_1 + x_2$ )。<sup>①</sup>而当存在外部时间压力( $\mu > 0$ )时,政府政策目标还需满足本国企业先于外国企业取得突破,其将面临最大化研发投入效率(仅资助低研发成本企业)与应对外部时间压力之间的权衡取舍。具体而言,由于增加两家本国企业在竞赛早期共同进行研发的时长,能够提升本国企业率先取得研发突破的概率,当两家本国企业边际研发成本的差异较小时,政府将有动机同时资助高成本企业,通过牺牲部分静态研发效率,延长两家本国企业并行研发时长,以最大化本国企业“整体胜率”(率先取得突破概率)的政策目标。最后,当两家企业成本相同( $c_1 = c_2$ )时,政府将给予两家企业等额事前资助。这一理论结论亦揭示了我国“揭榜挂帅”政策的微观机理:当面临较高的外部时间压力( $\mu$ 较大)时,政府的最优策略是放弃将资源集中于最低成本企业,选择资助高成本企业以维持“赛马制”并行研发,从而在紧迫的时间窗口内最大化整体胜率。

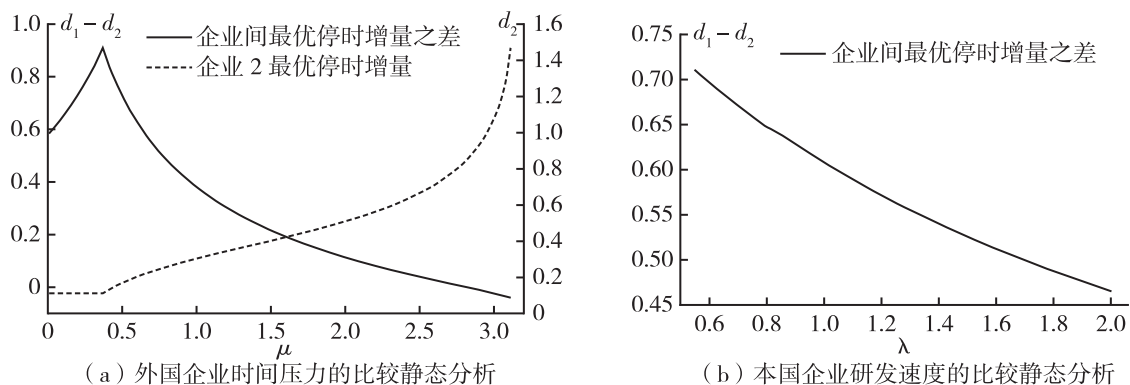


图2 外部时间压力和本国企业研发速率对政府研发资助分配政策影响

图2展示了外部时间压力 $\mu$ 和本国企业的研发速率 $\lambda$ 变化对政府研发资助策略偏向性的数值分析结果。<sup>②</sup>图2(a)说明,当外部时间压力较小( $\mu < 0.4$ )时,政府可通过优先资助边际研发成本更低的本国企业1,最大化研发投入效率,从而提升本国企业的整体胜率。然而,随着外国企业持续研发对我国率先取得技术突破带来的时间压力增加,政府可在总预算不变的前提下通过增加对边际成本较高的企业2的资助,延长两家企业并行研发的时长,换取更高的瞬时研发突破概率。因此,随着外部时间压力的上升与对高成本企业资助力度的增加,两家本国企业间研发投入停止的时间差将逐渐缩小。图2(b)进一步揭示了本国企业研发速率 $\lambda$ 对资助策略的影响。可以看出,随着本国企业研发速率 $\lambda$ 的提高,政

① 此时,政府的目标函数可简化为: $P(x_1, x_2) = p_0(1 - e^{-\lambda(x_1 + x_2)})$ ,是研发总投入的单调增函数,其决策问题可类比于一个在两件“价格”(边际研发成本)不同、但“质量”(研发产出)相同商品间的消费者选择问题。此问题的最优解必为角点解,即政府将全部预算分配给边际研发成本更低的企业1,以最大化其所能“购买”的总研发投入时长。

② 参数环境为 $R = 6, c_1 = 0.5, c_2 = 1, p_0 = 0.2, B = 0.1$ ;左图固定 $\lambda = 1$ ,变动 $\mu$ ,右图固定 $\mu = 1$ ,变动 $\lambda$ ;两图的左纵轴均为两家本国企业在最优合约下增加的研发时长之差,右纵轴均为本国企业2在最优合约下所增加的研发时长。

府可通过更为均等的研发资助( $d_1 - d_2$ 越来越小)提高其在大国科技竞争中的胜率。

上述分析为我国以研发项目申报机制为代表的前沿技术资助政策,提供了适应大国科技竞争环境动态变化的“分类分级”调整思路:(1)针对研发时间紧迫性较低的前沿技术领域,可延续项目申报竞争机制,识别高潜力研发主体,优先扶持“专精特新”类高效企业,形成“资源集中、重点突破”的资助模式;(2)面对亟须在短时间内取得突破的技术领域,资助政策则应从重点支持单一优势企业,转向鼓励多元主体参与,扩大试错与并行探索的覆盖面,以抢占当前大国博弈背景下日益紧迫的技术突破窗口期。

## 五、多条技术路线下最优路线布局资助策略

本部分进一步分析当某项前沿技术研发具有多条潜在技术路线时,政府和两家本国企业的最优路线偏好以及相应的政府最优资助策略。在此设定下,政府通过研发资助合约激励企业达到其所期望的研发投入前,须首先引导两家企业在技术路线选择上与政府目标一致。而一旦确定各自技术路线,政府即可参考前述定理1的研发投入资助策略,结合外部时间压力与企业研发成本差异,分别与两家企业签订基于研发投入的资助合约。

鉴于政府的技术路线布局资助策略将取决于其与企业自发技术路线选择的差异,本部分将首先考察在企业与技术路线双重异质性下政府的最优技术路线布局。不同于以本国企业整体胜率为目标的政府,两家本国企业仍以各自期望利润最大化为决策目标,并且作为研发成本的实际承担者,企业与技术路线两个层面的成本差异均会影响其路线选择偏好。为厘清政府路线布局策略的核心作用机制,本部分将分别构建两类基准情形——“企业研发成本同质”( $c_1 = c_2$ )与“路线研发成本同质”( $\psi_1 = \psi_2$ ),通过分离两类成本差异对企业路线选择偏好的边际影响,推导出不同外部环境下政府的最优资助策略。本文附录将通过数值分析验证上述机制与资助策略在企业与路线的双重成本差异下的稳健性。

### (一)政府最优技术路线布局

首先注意到,即使政府与企业均无法获悉技术路线间的可行性差异,但由于不同技术路线间存在着可预估的资源投入差异,多技术路线情形下的研发成本差异也可能同时存在于企业与技术路线两个层面。不失一般性,假设当技术路线存在投入成本差异时,技术路线2的研发投入成本高于技术路线1,即 $\psi_2 > \psi_1$ 。由于两家本国企业同时进入高投入成本的技术路线2显然并非最优,政府在技术路线布局偏好上可出现三种模式:(1)两家企业均进入边际研发成本较低的技术路线1的集中研发;(2)由低成本企业1承担高成本路线2、高成本企业2进入低成本路线1的“逆向分散研发”;(3)低成本企业1进入低成本技术路线1、高成本企业2承担高成本技术路线2的“同向分散研发”。

命题1:政府的技术路线布局偏好为:

(1)当不存在外部时间压力( $\mu = 0$ )时,政府对两类分散研发无差异,并严格优于集中研发。

(2)当存在外部时间压力( $\mu > 0$ )时,则存在一个关于技术路线研发成本差异( $\psi_2 - \psi_1$ )的阈值 $\Delta_g > 0$ ,使得政府的最优技术路线布局是“逆向分散研发”,当且仅当 $\psi_2 - \psi_1 < \Delta_g$ 时;否则,政府的最优技术路线布局是集中研发。

命题1依然体现了政府在静态研发效率与外部时间压力之间的权衡。首先,当不存在时间压力( $\mu = 0$ )时,两家本国企业各自探索一条技术路线的可行性,可有效分散单一路线不可行的风险,提高本国企业取得研发突破的整体概率,而两家企业同处于一条技术路线的集中研发模式将使我国整体上失去探索另一条技术路线可行性的机会。基于静态研发效率,此时政府必然偏好分散技术路线,且由于不存在外部时间压力,两种分散研发模式下的总研发投入相等,故政府并不严格偏好以何种方式分散。

而当存在时间压力( $\mu > 0$ )时,政府可通过延长两家本国企业在竞赛前期的并行研发时长,提高该技术路线单位时间内的研发投入强度,进而增加本国先于外国企业实现技术突破的概率。因此,能够最大化并行研发时长的“逆向分散研发”,严格优于加剧两者研发时长差异的“同向分散研发”模式。而与逆向分散相比,集中研发虽然减少了企业的总研发投入成本,但在两条技术路线的研发投入成本差异较小时,这一企业总研发成本节约的收益无法抵消由于单一技术路线不可行风险所带来的损失。因此,只有在两条技术路线的研发投入成本差异足够大( $\psi_2 - \psi_1 > \Delta_g$ )时,政府才会倾向于两家企业同时进入(低成本)技术路线1的集中研发模式。以前述的量子计算技术为例,当存在外部时间压力但技术路线间成本差异较小(如超导与离子阱的初期投入差距尚未拉大)时,政府的最优布局是“逆向分散研发”,即通过资助政策引导高效(低成本)企业进入离子阱等高成本技术路线;而当成本差异过大(如稀释制冷机等核心设备的进口受限导致超导路线成本激增)时,政府则需重新评估集中研发的可行性。<sup>①</sup>

## (二)基于路线研发成本差异的最优布局资助策略

当企业研发时长差异仅源于技术路线成本(企业研发成本同质, $c_1 = c_2$ ;而技术路线2的成本更高, $\psi_2 > \psi_1$ )时,通过比较两家企业在不同路线组合下的期望利润,下述命题给出了无政府资助情况下的企业技术路线选择。

命题2:当仅存在技术路线研发投入成本差异( $\psi_2 > \psi_1$ )时,存在一个关于 $\psi_2 - \psi_1$ 的阈值 $\Delta_f > 0$ ,使得:当 $\psi_2 - \psi_1 > \Delta_f$ 时,两家本国企业均选择低成本技术路线1;如不然,则存在两个对称的纳什均衡,即两家本国企业各自进入一条技术路线。

首先,注意到当 $\psi_2 = \psi_1$ 时,分散和集中技术路线的差异由以下三个效应共同决定:(1)分散研发的竞争规避效应,即若两家本国企业处于同一技术路线且该技

<sup>①</sup> 需要明确的是,本文所探讨的“多路线分散”策略主要针对已完成前期基础验证、具备工程化探索价值的少数核心备选路线。现实中前沿路线的启动存在极高的固定沉没成本与最短有效探索期,本文旨在探讨跨越该门槛后的最优多样化研发资源分配,而非无约束地全面铺开试错。

术路线可行,则相较分散于两条技术路线,此时两家企业必然处于更为激烈的研发竞争中;(2)分散研发的抢先终止效应,即当两家企业分散于不同技术路线,若一家企业所处的技术路线不可行,则该企业可能因对手研发成功而提前终止研发,从而节省无效投入;(3)集中研发的信息溢出效应,即若两家企业在同一技术路线上,一家企业的研发结果(无论成败)将同步更新双方关于路线可行性的信念,使得在路线不可行时双方均能及时终止无效投入。可以看到,前两类效应使得两家企业偏向分散研发,而信息溢出效应则使两者均偏向集中研发。命题2进一步表明,当两条技术路线的成本差异较小时,前两类效应仍使企业倾向于避开对手,充分利用分散技术路线带来的优势;然而随着两条技术路线的成本差异增加( $\psi_2 - \psi_1 > \Delta_f$ ),技术路线分散所带来的期望收益提升无法覆盖选择高研发成本技术路线的潜在利润损失,从而使得两家企业偏好转变为同时选择低成本的技术路线1。

图3展示了时间压力对政府与企业的技术路线偏好阈值的影响。<sup>①</sup>注意到,随着外部时间压力参数 $\mu$ 增加,外国企业更有可能在竞赛前期取得突破,从而使得路线初始的成本差异对于企业期望收益的影响更为显著,此时两家本国企业均会更倾向于选择边际研发成本更低的技术路线1,如图3实线所示企业技术路线偏好阈值随外部时间压力参数 $\mu$ 增加而减小。此外,政府对于“集中研发提升本国企业率先实现突破”与“分散研发规避单一路线不可行风险”的权衡取舍,使得其技术路线偏好阈值与 $\mu$ 之间并不呈现单调关系:随着外部时间压力增加,政府首先将更倾向于两家本国企业选择同一技术路线,通过增加竞赛前期两家本国企业的共同研发时长,提升本国企业率先取得突破的整体概率;然而,随着 $\mu$ 的进一步增大,外国企业在短时间内实现技术突破的概率显著提高,此时集中研发带来的胜率提升逐渐无法抵消单一路线不可行风险所造成的胜率损失,从而使得政府重新转向分散研发布局,如图3虚线所示政府技术路线偏好阈值随 $\mu$ 增加而小幅回升。

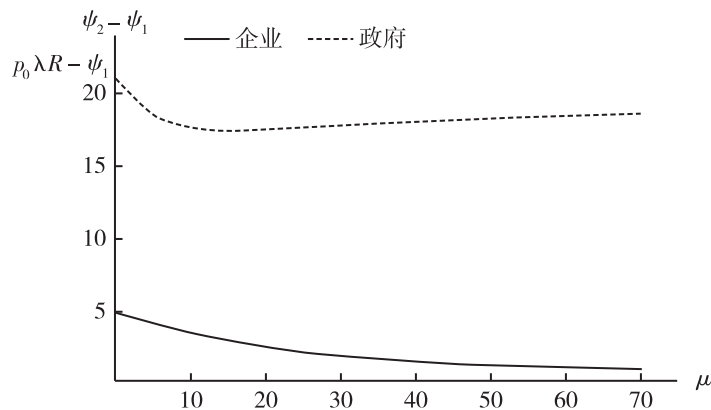


图3 外部时间压力对政企技术路线偏好阈值的影响

<sup>①</sup> 参数环境为 $\lambda = 5, R = 12, \psi_1 = 3, p_0 = 0.4$ ;横轴为外部时间压力 $\mu$ ,纵轴为基于路线研发成本差异 $\psi_2 - \psi_1$ 的阈值。

结合命题1和命题2,定理2给出了仅存在技术路线研发投入成本差异时的政府最优路线布局资助策略。

定理2:当两家本国企业间无研发成本差异时,企业偏好进入不同技术路线的研发成本差异阈值( $\Delta_f$ )小于政府偏好企业进入不同技术路线的研发成本差异阈值( $\Delta_g$ ),即当 $\psi_2 - \psi_1 \in [\Delta_f, \Delta_g]$ 时,政府可通过一笔技术路线布局资助引导企业进入不同技术路线,实现政府最优路线布局。

定理2说明了在当前的大国科技竞争情境下,政府如何通过技术路线布局资助政策协调两家本国企业在技术路线上的研发分工,防止企业扎堆选择低成本技术路线的“内卷式”研发。具体而言,当两条技术路线的成本差异足够大或足够小时,企业与政府不存在路线选择偏好的差异:当成本差异足够大( $\psi_2 - \psi_1 > \Delta_g$ )时,政企双方均偏好两家本国企业同时进入研发成本更低的技术路线1;当 $\psi_2 - \psi_1 < \Delta_f$ 时,则政府和企业都倾向于分散研发。此时市场机制自发形成的技术路线布局亦符合政府目标,政府无须干预企业的技术路线选择,而是在两家企业确定各自技术路线后给予相应资助以提升其研发投入即可。

而当 $\psi_2 - \psi_1 \in [\Delta_f, \Delta_g]$ 时,政府与企业间的偏好存在不一致。其原因在于,此时( $\psi_2 - \psi_1 < \Delta_g$ )政府更偏好两家本国企业逆向分散研发以提高两家本国企业在竞赛前期的并行研发时长,而作为研发成本的承担主体,此刻( $\psi_2 - \psi_1 > \Delta_f$ )企业对于不同技术路线的成本差异更为敏感,两家企业均希望选择边际成本较低的优势技术路线以最大化自身收益。此时,政府应充分发挥调节作用,通过技术路线布局资助补偿选择高成本技术路线的成本劣势,引导本国企业从低成本技术路线上的“内卷式”研发,转向探索不同技术路线可行性的协同分工新格局,确立我国在当前大国科技博弈中的战略主动权与核心优势。

定理2亦揭示了前述量子计算技术案例中《北京经济技术开发区关于推动量子科技和产业发展的若干措施》等政策设计的核心机制:通过事前提供定向的布局资助,同时支持超导、离子阱、中性原子和光量子等技术路线,满足进入高成本路线企业的事前参与约束,从而纠正市场短视,确立多路线协同研发的战略格局,进而提升我国前沿技术攻关的整体胜率。

### (三)基于企业研发成本差异的最优布局资助策略

当企业研发时长差异仅由企业的研发投入成本决定(技术路线的研发成本同质, $\psi_2 = \psi_1$ ;而企业2的研发成本更高, $c_2 > c_1$ )时,下述命题给出了企业在无政府资助情况下的技术路线选择偏好。

命题3:当仅存在企业研发投入成本差异( $c_2 > c_1$ )时,高成本企业2必然偏好分散技术路线,低成本企业1则在路线可行性的初始信念 $p_0$ 与企业研发投入成本差异 $c_2 - c_1$ 均足够大时偏好集中技术路线。

命题3表明,对于研发投入成本较高的企业2,给定企业1的技术路线选择,其将必然选择另一条技术路线以规避竞争,这一决策逻辑与命题2一致。但对于低研

发投入成本的企业1,给定对手的技术路线选择,其可能更偏好与对手选择同一路线进行研发。其核心逻辑在于:在面对高成本的企业2时,企业1能够利用处于相同技术路线的集中研发信息溢出效应,加速企业2(未取得突破情况下)对该技术路线可行性信念的衰减,并通过叠加企业2的高研发成本压力迫使其提前退出,进而独占后续研发机会与市场。换言之,在路线同质但其自身与对手企业有研发成本差异的情况下,两家企业均存在等待对手先行决策的动机;这一后行策略旨在根据对手已选定的路线,做出自身最优的路线选择应对,以获取“后行优势”。图4展示了不同参数组合下低成本企业1的路线选择偏好。可观察到,同等外部时间压力 $\mu$ 下,当具有成本优势的企业1对于技术路线可行性的初始信念 $p_0$ 越高,其越倾向在更具成本优势( $c_2 - c_1$ 较大)时与企业2进入相同技术路线,并通过信息溢出效应加速企业2退出研发(图4(b)相较于图4(a)的黑色阴影面积)。

结合命题1所得的政府最优技术路线布局偏好,下述定理描述了仅存在企业研发投入成本差异时的政府最优路线布局策略。

定理3:当两条技术路线间无研发成本差异时,政府可通过资助低成本企业1先行选择技术路线,实现政府的最佳技术路线布局。

注意到,与“路线异质、企业同质”情形下的政府布局资助(定理2)相比,虽然定理3所对应的“路线同质、企业异质”情形同样仅在“企业偏好集中、政府偏好分散”时通过布局资助引导企业的路线选择,然而两者内在逻辑存在本质差异。不同于定理2通过对自愿选择高成本研发路线的企业提供资助解决因路线成本差异导致的“资源配置失灵”,定理3旨在破解因企业成本差异导致的“策略协调失灵”。具体而言,当两家研发成本差异较大的本国企业无法自主分散至两条成本无差异的技术路线上展开研发,定理3表明政府可以将两家企业间的“同时路线选择博弈”,转变为由具备成本优势的企业1先行选择路线的序贯博弈形式,并通过路线布局资助政策补偿企业1因率先锁定技术路线而丧失的“后行优势”。图4展示了不同参数组合下低成本企业1的路线选择偏好。可观察到,同等外部时间压力 $\mu$ 下,企业1对于技术路线可行性的初始信念 $p_0$ 越高,其越倾向在更具成本优势(即 $c_2 - c_1$ 较大)时与企业2进入相同技术路线,并通过信息溢出效应加速企业2退出研发;见图4(b)与(d),相较于图4(a)与(c)的黑色阴影面积。进一步比较图4(b)与(d),可发现随着 $\mu$ 增大,由于外国企业在竞赛早期取得突破的概率增加,企业1只有在企业2的研发成本 $c_2$ 较大时才可能选择与企业2进入同一技术路线。

针对研发成本主要由企业异质性决定的前沿技术领域,定理3为政府优化相关研发资助政策与项目指南条款提供了理论依据。比如,在政府产业引导基金或重大科研项目的申报指南中,可针对率先承诺进入特定技术路线的先行企业设立“路线先行资助”,以补偿其因提前锁定路线而损失的策略灵活性与“后行优势”,从而缓解企业间的无效策略博弈对国家战略目标推进造成的损耗。在此基础上,可进一步建立公开透明的“梯次资助”机制,通过分层次、分阶段的资金安排,引导其他企业的技术路线选择,形成“先行定锚、梯队协同”的研发组织布局。

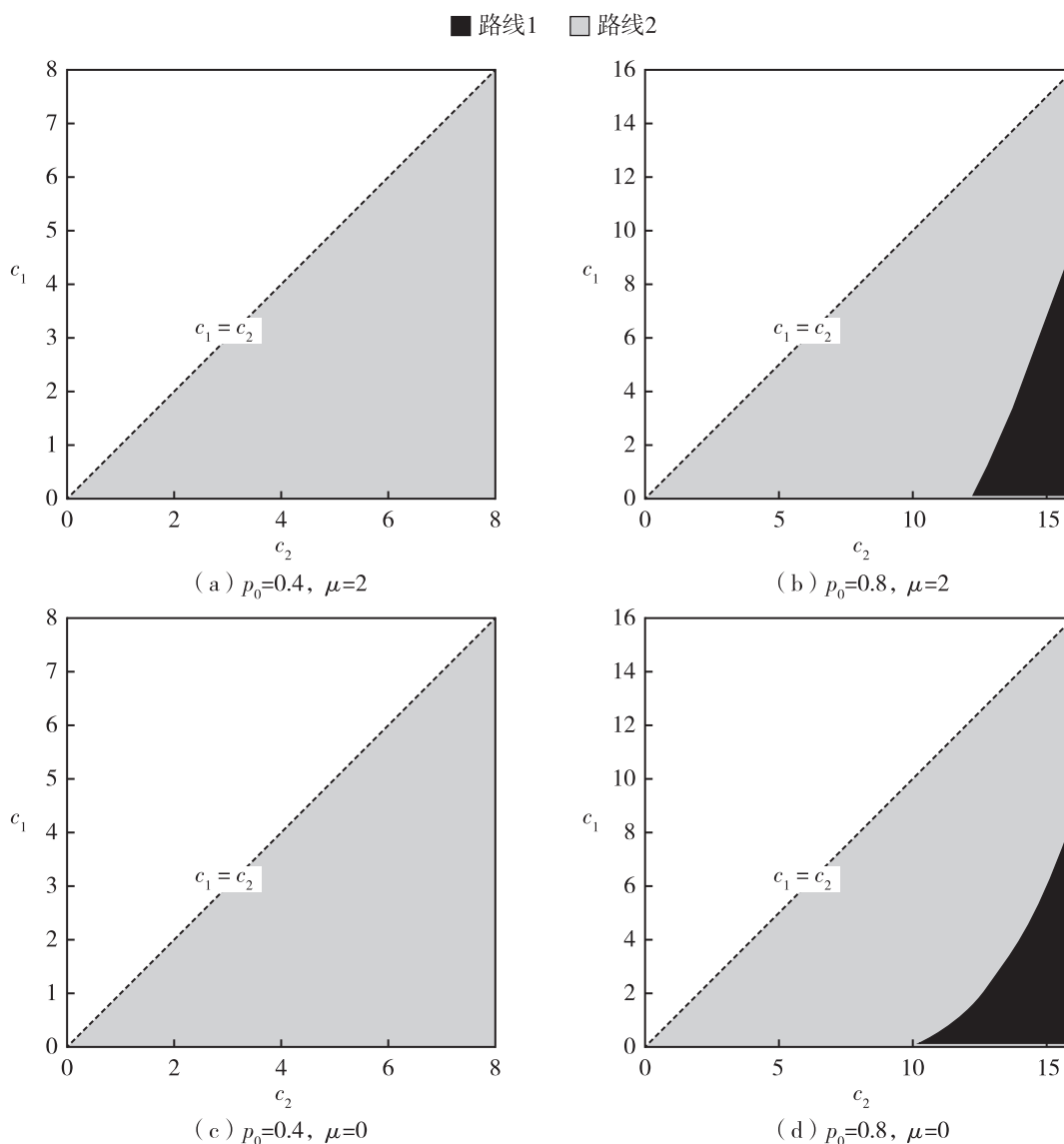


图4 企业研发成本差异下低成本企业1路线选择

## 六、结论与政策启示

在当前大国科技竞争深刻重塑全球创新格局的背景下,关键核心技术自主可控已超越单纯经济利益考量,成为攸关国家安全与发展主动权的战略议题。我国企业在前沿技术研发的过程中,正面临双重挑战:一是国外竞争对手可能率先突破所形成的外部时间压力,二是自身技术路线的不可行风险。本文构建了一个非对称动态研发竞赛模型,系统刻画我国企业的前沿技术路线与研发投入选择,并据此推导政府在不同竞争态势下的差异化技术路线布局与研发投入资助策略,以提升我国企业在相关前沿科技领域竞争中的整体胜率,实现从“跟跑”到“并跑”再到“领跑”的历史跨越。

在单一技术路线下,本文研究发现,我国前沿技术资助策略应根据外部时间压力变化,实施“分类分级”调整:当外部竞争压力较缓和时,政府应遵循“研发效率优

先”原则,集中资源支持边际成本更低的优势企业;而当面临紧迫的时间压力时,最优策略则转向“突破时间优先”,即通过资助高成本企业维持多主体并行研发,以牺牲部分研发投入效率换取时间窗口内的率先突破概率。当某项前沿技术存在多条具有成功可能性的技术路线时,基于自身利润最大化目标的企业与着眼本国整体胜率最大化的政府之间存在目标偏离。此时,政府应通过“技术路线布局资助”引导本国企业的路线选择,协调统一政府与企业的行为目标。若无外部时间压力,为避免失去探索机会,政府始终倾向引导两家企业分别进入不同路线进行分散研发。当存在时间压力时,则存在一个成本差异阈值:若路线间成本差异小于该阈值,政府应通过资助引导高效率企业进入高成本路线、低效率企业进入低成本路线,以实现基于有效分工的“有组织研发”;若成本差异超过阈值,则集中资源于低成本路线进行攻关更为有效。与此同时,企业出于利润最大化动机,倾向“扎堆”于低成本路线,从而忽视高成本路线潜在的突破可能性,导致市场自发配置无法实现国家整体胜率最大化的战略目标。<sup>①</sup>因此,政府有必要通过实施定向资助,激励企业探索被市场忽视的潜在技术路线。而在技术路线确定后,政府即可参照前述单路线情形,结合外部时间压力与企业间研发成本差异,分别与两家企业签订“分类分级”研发资助合约。

本文研究为当前大国科技竞争背景下,政府如何协调政企在技术路线选择上的目标分歧、提升企业持续研发意愿,以抢占科技竞争和未来发展制高点,提供了如下政策启示。

第一,应构建并实施一套以动态评估与精准响应为核心的前沿技术决策情报支持体系。该体系的核心在于,通过对外部竞争时间压力、技术路线可行性、企业研发效率与研发路线效率等关键维度信息进行系统性的定量评估,实时研判并调整资助导向,以实现稀缺研发资源的动态有效配置。具体而言,建议建立国家级跨学科、跨部门的科技竞争情报平台,并以国际竞品迭代速度、标准联盟动向、关键设备与材料可得性、出口管制与技术壁垒变化等为核心指标,持续监测并量化关键核心技术攻关的国际进展态势与战略窗口期。同时,依托由多学科专家学者与企业一线研发人员组成的评估委员会,对多条潜在技术路线的科学基础、研发投入成本与供应链风险进行定期评估与更新。通过上述“监测—评估—决策—再优化”的动态反馈机制,确保我国前沿技术研发资助政策能够伴随内外部环境变化持续迭代,从而在研发效率与战略风险、集中攻关与多元探索之间实现动态平衡,系统提升我国在大国科技竞争中的整体胜率。

第二,应根据外部研发竞争环境、企业研发效率与技术路线可行性差异,建立基于“效率—胜率”双维度的差异化研发资助方案。具体而言:(1)针对外部时间压力小且路线明确的领域,政策应坚持静态效率优先,通过优化“揭榜挂帅”等竞争性机制,将资源集中于研发投入要求更少的“专精特新”企业与优势技术路线,以保证

<sup>①</sup> 这一企业自发选择的微观逻辑与创新方向选择的经典文献结论一致(Bryan & Lemus, 2017; Hopenhayn & Squintani, 2021):在缺乏政策协调的市场中,逐利动机与抢先突破心态易诱发企业间的策略性模仿,导致研发资源过度集中于局部低成本优势路线。在本文所考察的大国科技博弈情境下,外部时间压力又进一步放大了这种市场失灵:高成本路线的潜在成功机会被忽视,而一旦低成本优势路线被证伪,国家将因技术路径单一而面临丧失战略主动权的系统性风险。

财政资金的使用效率。(2)对于攻关时间窗口期短且路线尚不明朗的领域,政府可在资助项目指南中明确优先资助的技术路线及关键指标,通过事前补偿企业选择高成本劣势技术路线所承担的额外风险溢价,避免企业在热门技术路线上的“内卷式研发”,引导企业在不同技术路线上形成服务于国家战略的差异化探索与协同研发布局。(3)应针对不同研发效率的企业设定差异化的资助标准与考核要求,避免政策“一刀切”。由于企业在低成本的优势技术路线上本身具有较强的持续研发意愿,政府在提供资助时应要求其达到更高的研发投入水平;而对于进入高成本劣势技术路线的企业,由于其边际激励成本更高,政府可相应给予较低的研发投入要求,从而在满足企业参与约束的前提下优化财政资金配置。

第三,基于事前承诺的研发资助,在解决企业流动性约束的同时,也可能带来由信息不对称引发的道德风险问题。为确保公共资金效益,需构建一个权责对等、透明可信的全过程治理体系。具体而言,首先,应构建跨部门的企业长效信誉机制。建立统一的企业及主要研发人员信誉档案,将其历史项目履约质量、资金使用合规性、科研诚信记录等全面纳入,并将该信誉评级与未来所有国家科研项目的申报资格、评审权重直接关联。通过构建可置信的长期惩罚威胁,将外部监管压力转化为企业珍视声誉的内在自律动力。其次,应建立分阶段拨付机制,将资金拨付与可验证的研发实物工作量及关键节点成果相挂钩,同时探索运用数字化手段,对非核心过程数据进行合规监测,从而提升政府的信息获取与验证能力。最后,应优化“事前资助、过程补贴与事后奖励”的政策工具组合,结合政府监管效率、研发成本风险等环境因素的变化,定期评估各类资助工具在具体领域中的成本效益,动态调整其组合结构与权重。

第四,由于前沿技术研发具有高投入、长周期与强不确定性的特征,若单纯依赖财政资金支持,不仅会加剧短期预算压力,也会使研发风险过度集中于公共部门,难以形成可持续的支持机制。建议政府积极拓展非财政性资源投入渠道,引导社会资本、金融工具及产业力量有序参与,共同构建“风险共担、收益共享”的创新生态体系。具体而言:(1)支持由产业链“链主”企业或平台“节点”企业牵头,联合上下游企业、研究型大学、地方国资等主体,共同出资设立实体化运作的创新联合体或专项基金。政府资金可以“母基金”(或“基石投资人”)身份参与,主要发挥引导、增信和杠杆放大作用,形成市场驱动、利益绑定、风险共担的研发共同体。(2)联合金融监管部门,推动开发针对路线转换、专利诉讼等特定风险的政策性保险产品,并通过低息信贷、保费补贴等金融工具为社会资本参与前沿技术探索“托底”。(3)鼓励政府部门在保证数据安全的前提下,探索对公共数据、算力资源等数据要素的合理估值与定价机制,通过“数据入股”“算力共享”等市场化手段,形成数据要素对前沿技术研发的长效支持机制。

基于本文构建的政府横向协调研发资源配置框架,未来的研究可能包含以下方面。首先,尽管本文已在前述附录中讨论了单一技术路线下企业道德风险与成本不确定性对政府资助策略的影响,但多技术路线情形下的主要结论仍建立在政府能够准确识别外部时间压力、企业研发成本及其机会主义行为的前提之上。未来研究可进一步放松这一完全信息假设,考察信息不完全条件下的最优资助机制设计。其

次,本文将企业研发成本视为静态外生参数,但在长期动态视角下,对高成本路线的补偿可能削弱企业事前降本激励,甚至诱发动态逆向选择。后续研究可尝试在多路线资助中引入跨期激励约束,以实现研发资源的动态最优配置。最后,本文将外部时间压力主要归因于外国企业持续研发投入,而现实中的外部约束往往还来自技术封锁、国际标准竞争与地缘政治冲击等更复杂因素。如何在高度不确定的国际竞争环境中设计兼具适应性与韧性的政府资助机制,亦具有重要现实意义与理论价值。

## 参考文献

- 安同良、千慧雄,2021:《中国企业R&D补贴策略:补贴阈限、最优规模与模式选择》,《经济研究》第1期。
- 安同良、姜舸、王大中,2023:《中国高技术制造业技术测度与赶超路径——以锂电池行业为例》,《经济研究》第1期。
- 陈志远、张杰、孙昊、任元明,2024:《创新链和产业链融合下的产业政策》,《经济研究》第9期。
- 陈强远、张醒、汪德华,2022:《中国技术创新激励政策设计:高质量发展视角》,《经济研究》第10期。
- 贺俊,2022:《新兴技术产业赶超中的政府作用:产业政策研究的新视角》,《中国社会科学》第11期。
- 何晴、刘净然、范庆泉,2022:《企业研发风险与补贴政策优化研究》,《经济研究》第5期。
- 寇宗来、孙瑞,2023:《技术断供与自主创新激励:纵向结构的视角》,《经济研究》第2期。
- 赖烽辉、李善民、王大中,2021:《企业融资约束下的政府研发补贴机制设计》,《经济研究》第11期。
- 李文健、翁翕、龚六堂,2022:《政府如何激励创新?——基于委托—代理理论的研究》,《经济学(季刊)》第2期。
- 刘志彪,2024:《产业链政策:中国建设现代化产业体系实践的新趋势》,《中国社会科学》第6期。
- 荣健欣、王大中、张天衡,2025:《产业链再造视角下的关键技术创新激励机制》,《经济研究》第1期。
- 吴超鹏、严泽浩,2023:《政府基金引导与企业核心技术突破:机制与效应》,《经济研究》第6期。
- 叶祥松、刘敬,2020:《政府支持与市场化程度对制造业科技进步的影响》,《经济研究》第5期。
- 余明桂、范蕊、钟慧洁,2016:《中国产业政策与企业技术创新》,《中国工业经济》第12期。
- 张杰,2021:《中国政府创新政策的混合激励效应研究》,《经济研究》第8期。
- Arrow, K. J., 1962, “The Economic Implications of Learning by Doing”, *Review of Economic Studies*, 29 (3), 155—173.
- Bimpikis, K., S. Ehsani, and M. Mostagir, 2019, “Designing Dynamic Contests”, *Operations Research*, 67 (2), 339—356.
- Bolton, P., and C. Harris, 1999, “Strategic Experimentation”, *Econometrica*, 67 (2), 349—374.
- Bryan, K. A., and J. Lemus, 2017, “The Direction of Innovation”, *Journal of Economic Theory*, 172 (6), 247—272.
- Halac, M., N. Kartik, and Q. Liu, 2016, “Optimal Contracts for Experimentation”, *Review of Economic Studies*, 83 (3), 1040—1091.
- Halac, M., N. Kartik, and Q. Liu, 2017, “Contests for Experimentation”, *Journal of Political Economy*, 125 (5), 1523—1569.
- Hopenhayn, H., and F. Squintani, 2021, “On the Direction of Innovation”, *Journal of Political Economy*, 129 (7), 1991—2022.
- Keller, G., S. Rady, and M. Cripps, 2005, “Strategic Experimentation with Exponential Bandits”, *Econometrica*, 73 (1), 39—68.
- Liu, Q., and Y. F. Wong, 2024, “Strategic Exploration: Pre-emption and Prioritization”, *Review of Economic Studies*, 91 (4), 2425—2461.
- Myerson, R. B., 1981, “Optimal Auction Design”, *Mathematics of Operations Research*, 6 (1), 58—73.
- Moroni, S., 2022, “Experimentation in Organizations”, *Theoretical Economics*, 17 (3), 1403—1450.

## Frontier Technology Route Allocation and R&D Funding Strategies Under Great Power Technological Competition

CHEN Zhuo<sup>a</sup>, ZHAO Yixuan<sup>b</sup> and LIU Yun<sup>a</sup>

(a: The Center of Economic Research, Shandong University;

b: School of Economics, Nankai University)

**Summary:** In frontier technology industries, domestic innovators often confront two intertwined uncertainties. On the one hand, they cannot always rely on mature foreign technologies and must therefore explore technological routes whose feasibility is unknown *ex ante*. On the other hand, technologically leading foreign firms may achieve breakthroughs earlier and then strengthen their advantages through patent protection, technical standards, and follow-up reinvestment. Under these conditions, technology route allocation and research and development (R&D) support become closely connected policy issues. This paper develops an asymmetric dynamic R&D race model involving two domestic firms and one foreign firm, and studies domestic firms' endogenous choices of technology routes and R&D duration, together with the government's optimal roadmap and R&D subsidy policies.

The model captures two core features of frontier innovation. For domestic firms, the chosen routes may be infeasible. As R&D remains unsuccessful, firms update beliefs according to an exponential learning process, and their posterior belief in route feasibility declines over time. Meanwhile, the foreign firm conducts R&D along a feasible route and may succeed first, thereby creating external time pressure on domestic firms. Within this framework, the paper analyzes both a single-route case and a multi-route case, and studies how external time pressure, firm heterogeneity, and route-specific cost differences shape decentralized firm behavior and optimal government policy.

Three main conclusions emerge. First, in the single-route case, the optimal subsidy pattern depends critically on the intensity of external time pressure. When such pressure is weak, support is better concentrated on the lower-cost domestic firm in order to maximize effective R&D duration. When the pressure becomes strong, however, policy may also need to support the higher-cost firm. Although this reduces static efficiency, it sustains parallel domestic R&D for longer and increases the probability that a domestic firm succeeds before its foreign rival.

Second, in the multi-route case, decentralized market choices may not coincide with the objective of maximizing the overall success probability of domestic innovation. Profit-maximizing firms tend to cluster on the lower-cost or otherwise more attractive route, because they prioritize private returns over the strategic value of diversified exploration. As a result, potentially feasible but relatively less favorable routes may be underexplored, and market-driven route choices may involve excessive concentration of R&D efforts. By contrast, the government values route diversification when diversification can reduce the risk of collective failure on a single route and improve the probability of timely domestic breakthroughs.

Third, optimal policy depends on the source of heterogeneity. When the key difference lies in route-specific R&D costs, support for the relatively less favorable route can mitigate excessive concentration on the lower-cost route. When the main difference lies in firm-specific R&D costs, the policy problem is more closely related to strategic coordination, and route allocation can be improved by encouraging early commitment by the more efficient firm. This paper also considers extensions with moral hazard and cost uncertainty and demonstrates that *ex ante* subsidies retain their value by easing early-stage R&D financing constraints and increasing the likelihood of R&D initiation. Overall, the analysis highlights the complementarity between route allocation and R&D support under external time pressure, and shows that innovation policy in frontier sectors should address not only average R&D efficiency but also route diversity and the maintenance of domestic experimentation.

**Keywords:** Great Power Technological Competition; External Time Pressure; Innovation Incentive Policy; Technology-route Allocation

**JEL Classifications:** C73, D83, O30

(责任编辑:未 钧)(校对:王红梅)